



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura

DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA DE PAINÉIS ESTRUTURAIS REFORÇADOS COM CONECTORES LONGITUDINAIS

MARIA ALEJANDRA MORALES MORALES

Foz do Iguaçu, PR
Dezembro de 2017



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura

DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA DE PAINÉIS ESTRUTURAIS REFORÇADOS COM CONECTORES LONGITUDINAIS

MARIA ALEJANDRA MORALES MORALES

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil
de Infraestrutura da UNILA, como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Aref Kalilo Lima Kzam.

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo de Melo Lameiras.

Foz do Iguaçu, PR
Dezembro de 2017

DEDICATÓRIA

Aos meu pais: Mario e Rosario,
Aos meus irmãos: Gabriela, Maruixi e Andrés,
E a todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos a mim.

AGRADECIMENTOS

Meus primeiros agradecimentos vão para Deus que me acompanhou ao longo deste tempo na finalização do curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, permitindo que eu chegasse até o fim deste trabalho e por ter me dado saúde e força para superar as principais dificuldades da vida.

O término deste trabalho representa o fim de uma etapa da minha vida e o começo de uma nova fase, é por isto que é importante expressar meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que estiveram do meu lado ao longo destes anos como universitária.

Ao meu orientador professor Aref Kalilo Lima Kzam, pela ideia inicial do trabalho, pela paciência, pela sabedoria e pela orientação durante grande parte do trabalho.

Ao professor engenheiro Marcelo Romo da Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE, por ser uma excelente pessoa, pela paciência e por seus ensinamentos no pouco tempo que lhe coube na realização deste trabalho.

A esta universidade, direção, professores, pela oportunidade de fazer o curso e permitir que a minha visão seja ampla no sentido de ter aprendido muito com o intercâmbio cultural, científico e educacional da América Latina.

A meus colegas de aula Edgar, Liz, Jairo, pelos momentos e experiências vividas na universidade, que me acompanharam desde o primeiro dia de aula até a etapa final de finalização do curso. E aos outros que fui conhecendo ao longo da realização do curso.

Aos amigos Paula Guerra e Elber Choque, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

A minha família que apenas com a simples presença emocional, mesmo longe de mim me trouxeram sossego nos momentos mais difíceis, tanto do curso quanto do trabalho de conclusão de curso.

Por último, mas não menos importante, agradeço à linda e maravilhosa cidade de Foz do Iguaçu e às pessoas que a tornam tão especial. Cidade esta, que me acolheu calorosamente durante estes anos.

RESUMO

Os painéis estruturais reforçados com conectores longitudinais são elementos estruturais amplamente utilizados na indústria da aviação, naval, na construção civil, e automobilística. De um modo geral, existem diferentes tipos de painéis com diferentes funções e diferentes materiais, podendo ser painéis de aço enrijecidos, painéis do tipo sanduiche, painéis ou chapas de concreto reforçado, painéis ou chapas apoiadas em madeira, entre outros. Este trabalho tem por objetivo determinar os valores das cargas críticas de painéis reforçados com conectores longitudinais e estudar o comportamento mecânico a partir da determinação da trajetória de equilíbrio dessas estruturas. Para atingir esse objetivo, inicialmente foi desenvolvido um modelo computacional para validação das respostas com relação à flambagem fornecidas pelo software SAP 2000 para avaliação da carga crítica. Depois foram feitos quatro modelos computacionais de painéis estruturais reforçados com conectores longitudinais constituídos por duas chapas planas com dois e três conectores com geometria diferente um do outro posicionados longitudinalmente nos painéis. Através do software SAP 2000, o qual se baseia no Método de Elementos Finitos (MEF), foram determinadas as cargas críticas de cada modelo desenvolvido e foram criadas as curvas de trajetória de equilíbrio a partir das deformações retiradas no meio da chapa do modelo. Foi determinada também a relação peso/resistência de cada painel desenvolvido e foi feito um estudo paramétrico para se ter um melhor entendimento de como a configuração do painel podem afetar na determinação da carga crítica. Os resultados mostram a grande influência dos conectores e do tipo de conectores longitudinais na determinação da carga crítica.

Palavras-chave: Painéis estruturais; Simulação numérica; Conectores Longitudinais.

ABSTRACT

Reinforced structural panels with longitudinal connectors are structural elements widely used in the aviation, naval, construction, and automotive industries. In general, there are different types of panels with different functions and different materials, such as stiffened steel panels, sandwich panels, reinforced concrete panels or panels, wood-backed panels or panels, among others. This work aims to determine the critical load values of reinforced panels with longitudinal connectors and to study the mechanical behavior from the determination of the equilibrium trajectory of these structures. To achieve this objective, a computational model was initially developed to validate the buckling responses provided by SAP 2000 software for critical load evaluation. Then four computational models of reinforced structural panels with longitudinal connectors were made consisting of two flat plates with two and three connectors with geometry different from one another positioned longitudinally in the panels. Through the SAP 2000 software, which is based on the Finite Element Method (MEF), the critical loads of each developed model were determined and the equilibrium trajectory curves were created from the deformations taken in the middle of the model plate. It was also determined the weight / resistance ratio of each panel developed and a parametric study was done to have a better understanding of how the panel configuration can affect the determination of the critical load. The results show the great influence of the connectors and the type of longitudinal connectors in determining the critical load.

Keywords: Structural panels; Numerical simulation; Longitudinal connectors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de painéis usados na construção de navios.	16
Figura 2. Tipo de painéis usados na construção de aviões.	16
Figura 3. Tipo de painéis usados na extração de petróleo.	17
Figura 4. Tipos de reforços mais comuns em placas planas.	18
Figura 5. Exemplos de conectores.	19
Figura 6. Conectores com comportamento unidirecional.	20
Figura 7. Conectores com comportamento bidirecional.	20
Figura 8. Exemplos de ligação em estruturas de aço	21
Figura 9. Geometria de uma placa.	22
Figura 10. Tipo de materiais para placas.	22
Figura 11. Pannel reforçado.	23
Figura 12. Elementos e solicitações em um painel enrijecido	24
Figura 13. Pannel reforçado como parte estrutural de um navio.	25
Figura 14. Pannel reforçado com estrutura ortogonal.	26
Figura 15. Geometria do painel Rackow.	27
Figura 16. Trajetórias de equilíbrio da estrutura	30
Figura 17: Instabilidade do equilíbrio	31
Figura 18. Chapa simplesmente apoiada sob compressão uniforme.	37
Figura 19. Modos de instabilidade local da chapa.	38
Figura 20. Modos de instabilidade local de chapa do SAP 2000.	39
Figura 21. Modos de flambagem a flexão da coluna larga.	40
Figura 22. Modos de instabilidade local de coluna larga do SAP 2000.	41
Figura 23. Cargas axiais e transversais que conduz a estrutura a condição de flambagem por flexão.	42
Figura 24. Elástica da deformada para 0.10 carga axial e carga transversal.	43
Figura 25. Elástica da deformada para 0.30 carga axial e carga transversal.	43
Figura 26. Elástica da deformada para 0.50 carga axial e carga transversal.	43
Figura 27. Elástica da deformada para 0.60 carga axial e carga transversal.	43
Figura 28. Elástica da deformada para 0.65 carga axial e carga transversal.	44
Figura 29. Trajetória de equilíbrio da coluna larga e primeiro modo de flambagem.	45
Figura 30. Configuração da malha de elementos finitos adoptada para os painéis, medidas em mm.	47

Figura 31. Disposição da malha de elementos finitos adoptada para os conectores, medidas em mm.....	47
Figura 32. Disposição da malha de elementos finitos adoptada para os conectores, medidas em mm.....	48
Figura 33. Malha inteira dos painéis com conectores longitudinais lisos.	48
Figura 34. Disposição do carregamento na malha dos painéis com conectores longitudinais.	49
Figura 35. Disposição do painel com conectores longitudinais lisos.	50
Figura 36. Disposição do painel com conectores longitudinais lisos.	50
Figura 37. Autovalores e autovetores do modelo I	51
Figura 38. Trajetória de equilíbrio para o modelo I.	52
Figura 39. Disposição do painel com conectores longitudinais furados.	52
Figura 40. Disposição do painel com conectores longitudinais lisos.	53
Figura 41. Autovalores e autovetores do modelo II	53
Figura 42. Trajetória de equilíbrio para o modelo II.	55
Figura 43. Disposição do painel com conectores longitudinais lisos triples.	55
Figura 44. Disposição do painel com três conectores longitudinais lisos.	56
Figura 45. Autovalores e autovetores do modelo III	57
Figura 46. Trajetória de equilíbrio para o modelo III.	58
Figura 47. Disposição do painel com conectores longitudinais furados triples.....	58
Figura 48. Disposição do painel com três conectores longitudinais furados.	59
Figura 49. Autovalores e autovetores do modelo IV	59
Figura 50. Trajetória de equilíbrio para o modelo IV.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Autovalores para a chapa simplesmente apoiada.	37
Tabela 2. Cargas de bifurcação da coluna larga.	40
Tabela 3. Propriedades dos materiais usados para a simulação do painel.....	46
Tabela 4. Variação da espessura dos painéis e dos conectores modelo I.....	61
Tabela 5. Variação da espessura dos painéis e dos conectores modelo II.....	62
Tabela 6. Variação da espessura dos painéis e dos conectores modelo III.....	62
Tabela 7. Variação da espessura dos painéis e dos conectores modelo IV.	63
Tabela 8. Relação peso/resistência dos modelos desenvolvidos.	63

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
CAPITULO 1 INTRODUÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	12
1.1 Introdução.....	12
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
CAPITULO 2 SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL	15
2.1 Painéis estruturais reforçados	15
2.1.1. História sucinta das principais aplicações.....	15
2.1.3. Materiais	17
2.1.3.1. Conectores	17
2.1.3.2. Placas	21
2.1.3.3. Pannel reforçado	23
2.2. Aplicações	24
2.3. Estudos Numéricos.....	25
2.3.1. Método de Elementos Finitos (MEF)	25
CAPITULO 3 FUNDAMENTAÇÃO DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE	28
3.1. Instabilidade estrutural: definições.....	28
3.2. Teoria geral da estabilidade elástica.....	30
3.3. Análise Linear de Estabilidade	32
3.4. Flambagem de Chapas, Flanges e Colunas Delgadas	33
CAPITULO 4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS	36
4.1. Modelos para validação da proposta	36
4.1.1. Modelo de chapa simplesmente apoiada.....	36
4.1.2. Modelo de coluna larga	39
4.1.2.1. Análise dos dois primeiros modos de flambagem	42
4.2. Modelos propostos desenvolvidos	45
4.2.1. Geometria dos modelos.....	46
4.2.2. Material.....	46

4.2.3. Definição da malha	47
4.2.4. Configuração de carregamento	48
4.4. Determinação da carga crítica.	49
4.4.1. Modelo I: Painel reforçado com conectores longitudinais lisos.....	49
4.4.2. Modelo II: Painel reforçado com conectores longitudinais furados.	52
4.4.3. Modelo III: Painel reforçado com conectores longitudinais lisos triples.	55
4.4.4. Modelo IV: Painel reforçado com conectores longitudinais furados triples.	58
4.3. Estudo paramétrico fazendo uso dos modelos construídos.....	61
4.3.1. Relação peso/resistência dos painéis	63
CAPITULO 5 CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

CAPITULO 1 INTRODUÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

1.1 Introdução

Uma alternativa para a construção moderna é a pré-fabricação. Segundo Cusinato e Guerra (2016), os pré-fabricados têm muitas vantagens quando comparados com a construção convencional, pois permite uma rápida produção dos elementos, melhor controle de qualidade, redução de resíduos, menor tempo de construção, além da redução da quantidade de mão de obra.

Hoje em dia não só pré-fabricados são uma tendência, os elementos estruturais relativamente esbeltos com uma capacidade de resistir a grandes cargas também são cada vez mais utilizados. Os painéis que apresentam conectores longitudinais na sua maioria são estruturas em aço largamente usadas devido a facilidade de fabricação suas aplicações vão desde a construção de edificações, até a fabricação da fuselagem de navios, automóveis e aviões. Estes tipos de painéis reforçados são constituídos principalmente por chapas finas e conectores longitudinais cuja finalidade é aumentar a capacidade de carga do componente estrutural. Também é importante destacar que a relação peso/resistência deste tipo de painéis reforçados, é pequena levando à estrutura a experimentar prematuramente o fenômeno de instabilidade de seus componentes.

Os painéis reforçados por conectores na direção longitudinal são utilizados em muitos sistemas estruturais, tais como o casco e convés de um navio, partes das estruturas offshore, plataformas de extração de petróleo, bem como qualquer estrutura onde a relação peso/resistência é importante (RIVERA, 2011).

Para avaliar o comportamento estrutural de um painel podem ser realizados estudos experimentais, analíticos e numéricos. Através desses estudos é possível quantificar os valores das cargas críticas que produzem a instabilidade. Estudos sobre a avaliação da estabilidade dos painéis já foram realizados por outros autores, como o realizado por Teles *et al* (2016). Neste trabalho, os autores apresentam estudos baseados na análise de estabilidade estrutural de estruturas de aço. Rackow *et al* (2015) faz em um estudo paramétrico de um painel com enrijecedor sob flexão elástica através do desenvolvimento de um modelo computacional desenvolvido no software ANSYS.

O comportamento de painéis reforçados submetidos a diferentes tipos de cargas tem sido amplamente estudado por vários pesquisadores ao longo de muitos anos. Na abordagem clássica, fórmulas analíticas foram desenvolvidas, tais como as de Timoshenko (1961), Danielson *et al* (1990), Hughes (1996) e, mais recentemente, Paik (2003). Tendo em vista que estas equações sejam desenvolvidas com base em hipóteses simplificadoras, os resultados não mostram sempre boa concordância com estudos experimentais. Apesar disto, servem como uma ferramenta para a compreensão da mecânica do problema (RIVERA, 2011).

No presente trabalho determinar-se as cargas críticas, a curva de trajetória de equilíbrio e a relação peso/resistência de painéis reforçados com conectores longitudinais. Diferentes configurações são utilizadas para os painéis. Os modelos são compostos por duas chapas com espessura de 6mm, comprimento de 3000mm e largura de 1000mm, dois e três conectores lisos com espessura de 2mm, comprimento de 3000mm e altura de 120mm e dois e três conectores com furos de diâmetro de 30mm com comprimento de 3000mm e 120mm de altura.

São desenvolvidos os modelos descritos acima no software SAP 2000, afim de avaliar os modos de instabilidade a partir da solução do problema de autovalores e autovetores dos painéis com diferentes conectores longitudinais.

Para validar o modelo deste trabalho será modelado no software SAP 2000, o modelo desenvolvido em Kzam (2016), com o intuito de entender melhor o comportamento estrutural de uma placa simplesmente apoiada nos bordos, encontrando as cargas críticas do modelo e as curvas de trajetória do modelo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é determinar as cargas críticas dos painéis estruturais com conectores longitudinais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atender o objetivo geral proposto, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Executar a simulação numérica dos painéis estruturais com dois e três conectores longitudinais;
- b) Estudar a influência da configuração geométrica dos painéis na carga crítica de estabilidade do painel.
- c) Obter as curvas de trajetória de equilíbrio para cada modelo desenvolvido.

CAPITULO 2 SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL

No presente capítulo apresenta-se uma breve revisão bibliográfica acerca das aplicações dos painéis estruturais reforçados com conectores longitudinais.

2.1 Painéis estruturais reforçados

2.1.1. História sucinta das principais aplicações

O princípio dos painéis estruturais reforçados não é uma invenção nova, mas simplesmente uma reaplicação dos conceitos utilizados em madeira compensada. Os antigos egípcios, por volta de 1500 D. C., usaram a ideia de cortar a madeira em folhas finas e colar para dar-lhe uma resistência maior. Pesquisa sobre a história de painéis estruturais revelaram que o Sr. William Fairburn foi a primeira pessoa a usar o princípio em 1849 em experiências com dimensionamento de pontes usando decks de madeira laminada e de concreto como uma viga mista (LEUNG, 1984).

A construção do sistema dos painéis reforçados foi inicialmente restrita a algumas aplicações, nomeadamente às indústrias aeroespacial e naval. Posteriormente, o seu campo de aplicação foi levado para a indústria automotiva e, mais recentemente, para a indústria petrolífera de extração e para a indústria eólica (CORREIA *et al.* 2012).

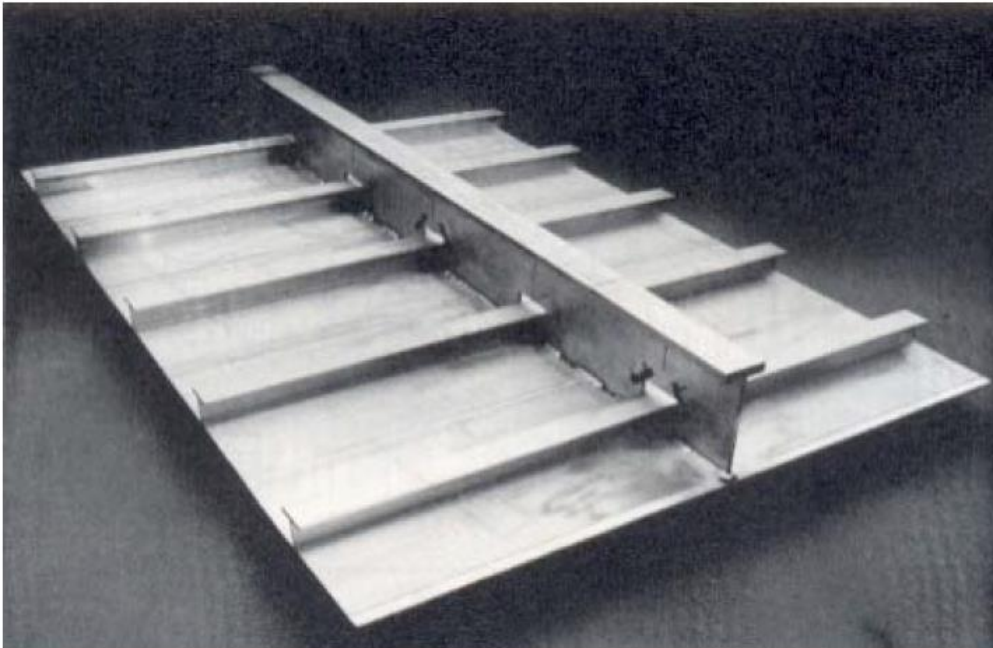
Segundo Collins (1974), um dos primeiros usos dos painéis para a construção civil foi em 1906. O painel foi construído com uma camada de 5.10cm de areia colocada entre duas camadas de concreto e amarrados com reforço. A areia foi finalmente lavada para fora, o painel foi levantado, resultando na criação de um painel de núcleo oco. As primeiras gerações desse tipo de painéis de concreto utilizaram materiais diferentes no núcleo. Esses materiais incluíram fibras de madeira, concreto leve, concreto com xisto e vidro.

Em 1935, foi construída uma casa unifamiliar com painéis de concreto pré-fabricado, no Subúrbio de Washington. As paredes exteriores da moradia foram então realizadas com duas camadas de concreto de espessura reduzida. Estas camadas não tinham função estrutural, sendo usada uma estrutura de madeira para apoiar os painéis e fornecer o apoio estrutural do edifício. Em 1951- 1952 foi construído um conjunto habitacional de 1000 casas em *Great Lakes*, Illinois, Estados Unidos, que foi considerado o primeiro grande projeto a utilizar painéis reforçados (BUNN, 2011).

Além da construção civil, as construções navais são constituídas basicamente de painéis reforçados. Os construtores navais desenvolveram os painéis reforçados,

que constam de chapeamento reforçado por um perfilado, que pode ter vários tipos distintos de seção, cada um pertinente a um tipo de carregamento e construção. (AMANTE, 2006).

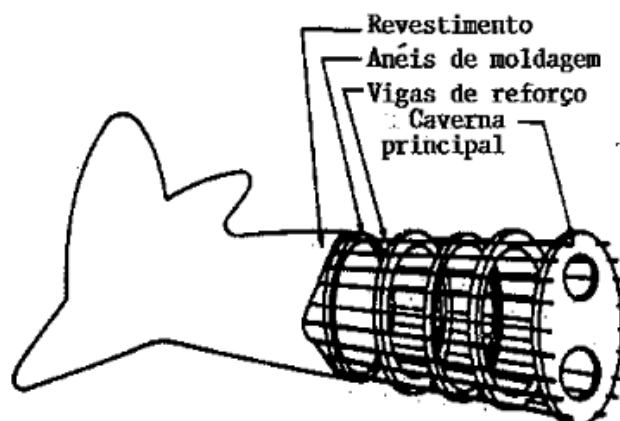
Figura 1. Tipo de painéis usados na construção de navios.



Fonte: Amante (2006).

Na construção do corpo principal das aeronaves ou a fuselagem (ver Figura 2), que é a estrutura principal do avião vem sendo geralmente construídas de tubos de aço soldados na estrutura a partir de conectores longitudinais. O maior problema envolvido na construção das estruturas dos aviões é manter uma resistência suficiente, com o peso dentro de limites aceitáveis.

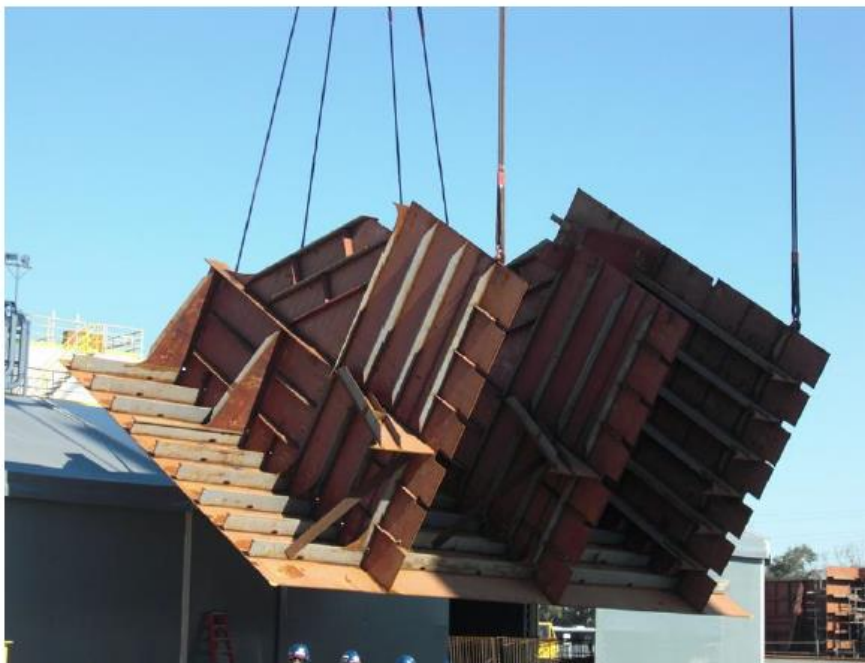
Figura 2. Tipo de painéis usados na construção de aviões.



Fonte: IVVO (2009).

Segundo Rackow (2015), os painéis reforçados utilizados na extração de petróleo ver Figura 3, são constituídos por chapas e reforços longitudinais, geralmente colocados com espaçamento constante entre si e perpendiculares ao bordo do painel, acompanhando a direção dominante da carga.

Figura 3. Tipo de painéis usados na extração de petróleo.



Fonte: Rackow (2015).

2.1.3. Materiais

2.1.3.1. Conectores

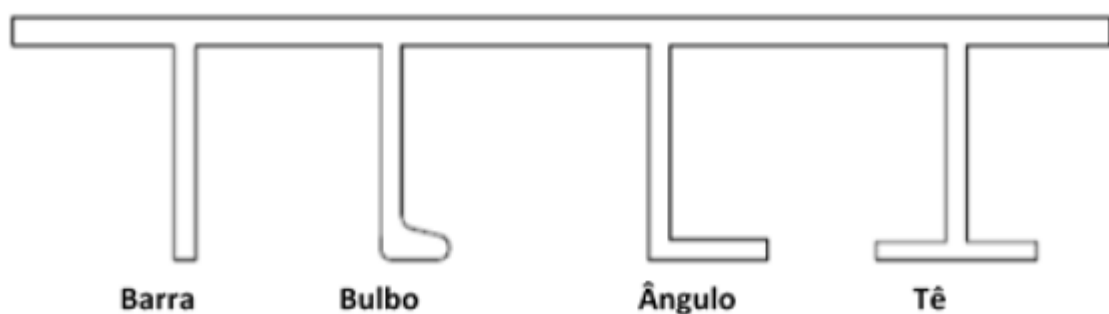
São elementos utilizados para amarrar as duas camadas podendo ser concreto ou de aço. A Figura 4, mostra os tipos de reforços mais utilizados para enrijecimento de placas planas em estruturas de aço.

Os conectores no caso de estruturas de aço são elementos lineares (barras) que, ao serem soldados à placa, conferem maior rigidez ao conjunto. Desse modo, o conjunto passa a apresentar maior resistência às solicitações (DE SOUZA,2009).

Estes conectores podem ser constituídos por zonas de concreto, elementos em aço ou mais recentemente por materiais poliméricos reforçados com fibras. Dependendo do tipo de aplicação a que se destina o painel, existem vários materiais e diferentes formas que podem ser utilizados em cada parte constituinte do sistema construtivo do painel.

Os painéis utilizados na construção de edificações apresentam diferentes arranjos e espaçamento, isto leva a que existam dois diferentes tipos de conectores que podem ou não fornecer transferência de esforço cortante nas camadas de concreto. De tal forma que o tipo de conectores depende de vários fatores, tais como, do grau de interação pretendido, da carga aplicada, da extensão do painel, não existindo regras específicas para organizar os conectores ao longo do painel (BENAYOUNE *et al.* 2008).

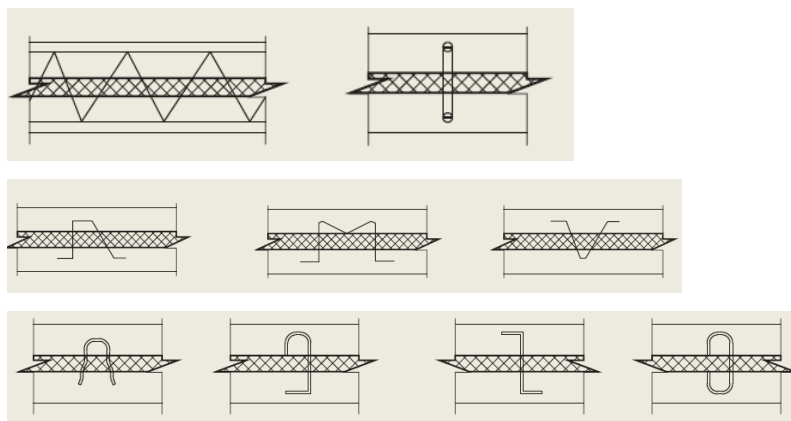
Figura 4. Tipos de reforços mais comuns em placas planas.



Fonte: Adaptado de Lameiras (2015).

Segundo Rizkalla e Dawood (2009), os conectores comumente utilizados para fazer a ligação entre as camadas de concreto são conectores metálicos. Mas, devido à elevada condutividade térmica desses conectores que penetram nas camadas, surgem pontes térmicas nas regiões das ligações, ocasionando perda de eficiência energética significativa dos painéis.

Os conectores na Figura 5, podem ser executados com vários materiais e possuem diferentes formas, como: C, Z, M, buchas de metal, ganchos, grelhas metálicas, treliças metálicas, pregos de plástico ou pinos e também malhas de fibra de carbono (AZEVEDO, 2013).

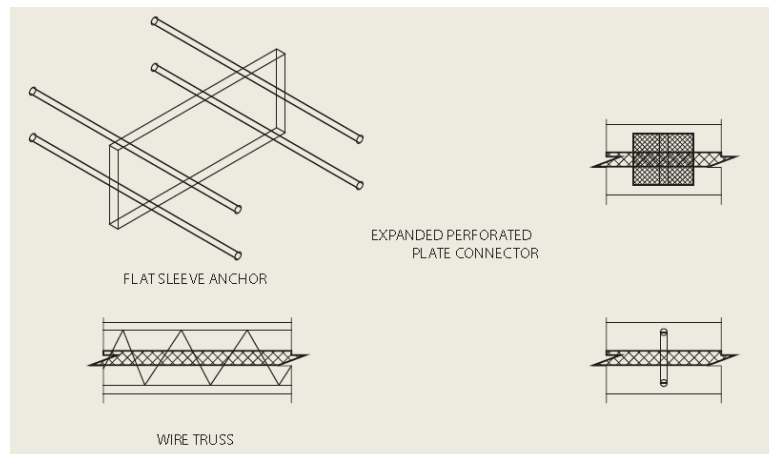
Figura 5. Exemplos de conectores.

Fonte: Adaptado de PCI (2011).

Existem dois tipos diferentes de conectores, os que transferem esforços de corte e os que não transferem esforço de corte (PCI, 2011). Os conectores que não transmitem corte normalmente são utilizados para resistir a forças de tração, garantindo que as duas camadas não se separem quando estão sujeitas a cargas transversais e fazendo com que elas atuem de forma independente. Estes podem incluir conectores metálicos, pinos de fibras e conectores de arame soldado. Estes conectores são geralmente usados com elevados espaçamentos entre si (SALMON *et al.* 1997).

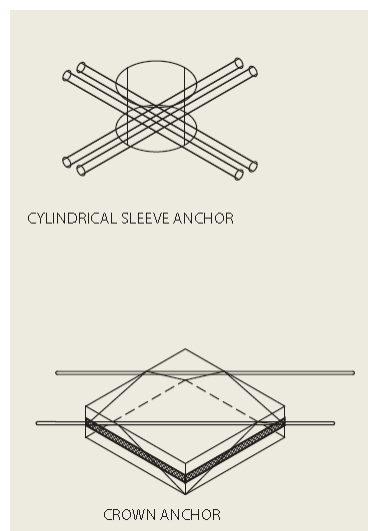
Os conectores de corte apresentam a capacidade de que possam ser transmitidos esforços de corte às camadas de concreto. Alguns conectores de corte podem ainda ser classificados como conectores de corte unidirecionais (rígidos numa direção e flexíveis na outra), exemplos destes são treliças de arame de aço longitudinais, nervuras sólidas de concreto, ancoragem de manga plana representados na Figura 6. Outros conectores de cisalhamento são rígidos em duas direções perpendiculares e, conseqüentemente, transferem forças de corte horizontais e transversais. Os conectores de corte bidirecionais (rígidos em ambas as direções) são representados na Figura 7, por exemplo: placas de conexão, ancoragem de manga cilíndrica e ancoragem de coroa. As placas de ligação e a ancoragem de coroa são normalmente instaladas em zonas sólidas de concreto e podem, portanto, ser consideradas como conectores de corte rígidos. Esses conectores podem variar entre conectores contínuos e discretos (PCI, 2011).

Figura 6. Conectores com comportamento unidirecional.



Fonte: Adaptado de PCI (2011).

Figura 7. Conectores com comportamento bidirecional.



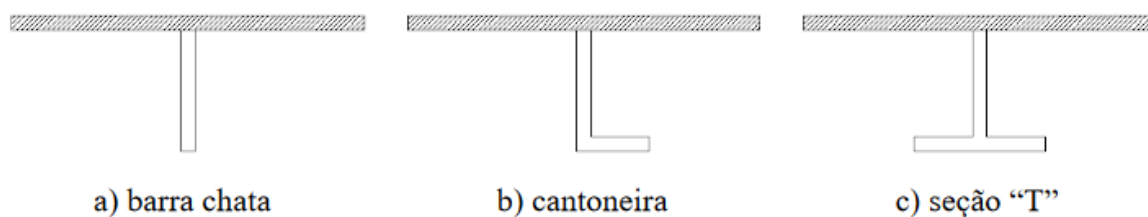
Fonte: Adaptado de PCI (2011).

Atualmente os conectores com Poliestireno Reforçado com Fibras (PRF) têm um maior emprego nos painéis sanduiche, devido ao fato de estes conectores não estarem sujeitos à corrosão e devido a sua baixa condutividade térmica em relação aos conectores de aço os quais podem afetar a eficiência do painel (TOMLINSON, 2015).

No caso de estruturas de aço as conexões entre pilar-viga, viga-viga, pilar-fundação são geralmente feitas pelos elementos de ligação como: chapas de ligação, placas de base, cantoneiras, enrijecedores, conforme mostra a Figura 8. Para ocorrer

essa união é necessário o uso dos meios de ligação, como a solda, parafusos, barras redondas rosqueadas ou pinos (VASCONCELLOS, 2011).

Figura 8. Exemplos de ligação em estruturas de aço



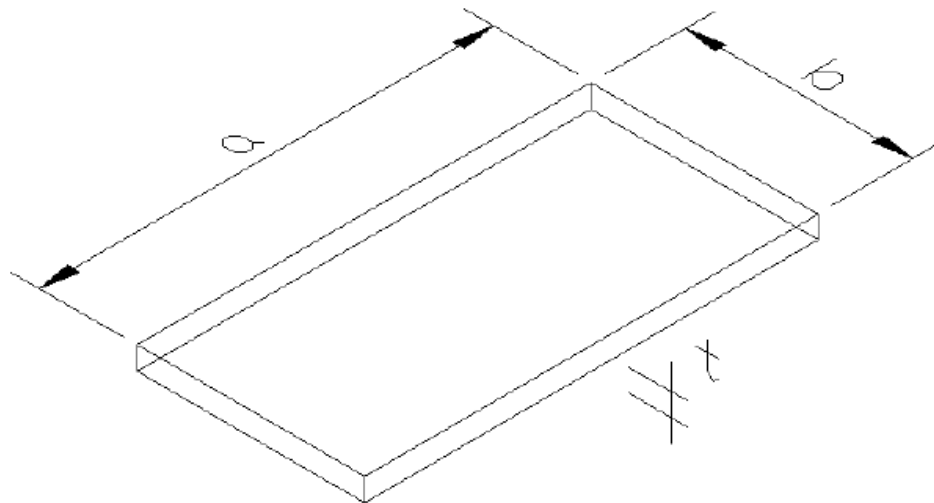
Fonte: De Souza (2009).

Segundo a NBR 8800:2008 as ligações são divididas em soldadas e parafusadas. As primeiras são preferíveis quando o meio é industrial, enquanto que as segundas são as mais usadas nos canteiros. Essa classificação, entretanto, é insuficiente, sendo necessário distinguir em relação aos esforços atuantes e à sua rigidez (VASCONCELLOS, 2011).

2.1.3.2. Placas

Placas são elementos nos quais duas dimensões (comprimento e largura) prevalecem sobre uma terceira (espessura). Uma importante relação é a esbeltez, definida como a razão b/t , na qual b é largura da placa e t é espessura da placa. Esta relação é de extrema importância na determinação do comportamento de uma placa quando submetida a carregamentos no plano e fora do plano. A relação a/b , sendo a o comprimento da placa (ver Figura 9), também é outro importante parâmetro utilizado na análise de placas e comumente utilizado para se definir placas longas e curtas (DE SOUZA, 2009).

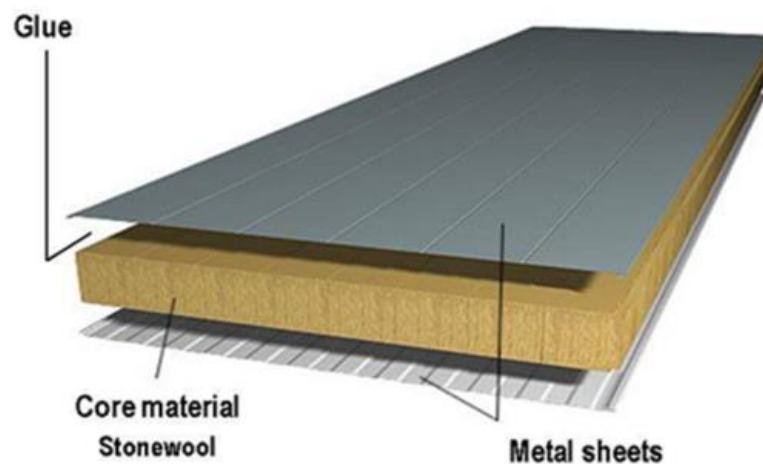
Figura 9. Geometria de uma placa.



Fonte: Costa (2009).

Os materiais que podem ser feitos as placas depende do uso que sera dado ou do tipo de estrutura para o qual a placa sera utilizada e das solicitações s que a que uma placa poder estar submetida. podendo ser de aço, madeira compensanda, concreto reforçado com fibras, concreto simples, etc. Os do tipo de madeira ou de concreto podem ser utilizadas com a finalidade de fechamento de paredes ou como revestimento como se mostra na Figura 10.

Figura 10. Tipo de materiais para placas.

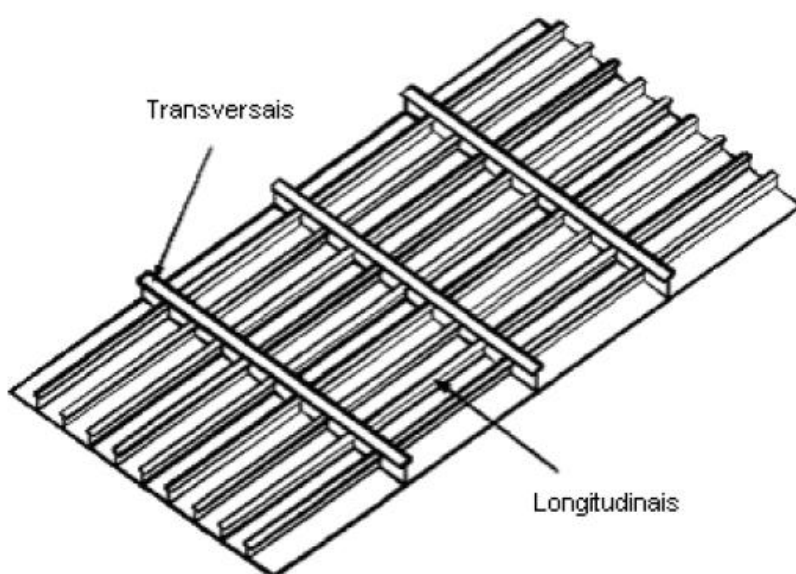


Fonte: Indiamart (2017).

2.1.3.3. Painel reforçado

O elemento estrutural constituído por uma chapa e vigas que atuam como reforço, geralmente em direções ortogonais, é denominado painel reforçado, ver Figura 11. Os painéis reforçados representam o elemento estrutural mais utilizado na estrutura de navios. Eles estão apoiados em elementos mais rígidos como anteparas longitudinais e transversais, cavernas, quilhas, formando a estrutura do navio (OROZCO,2009).

Figura 11. Painel reforçado.

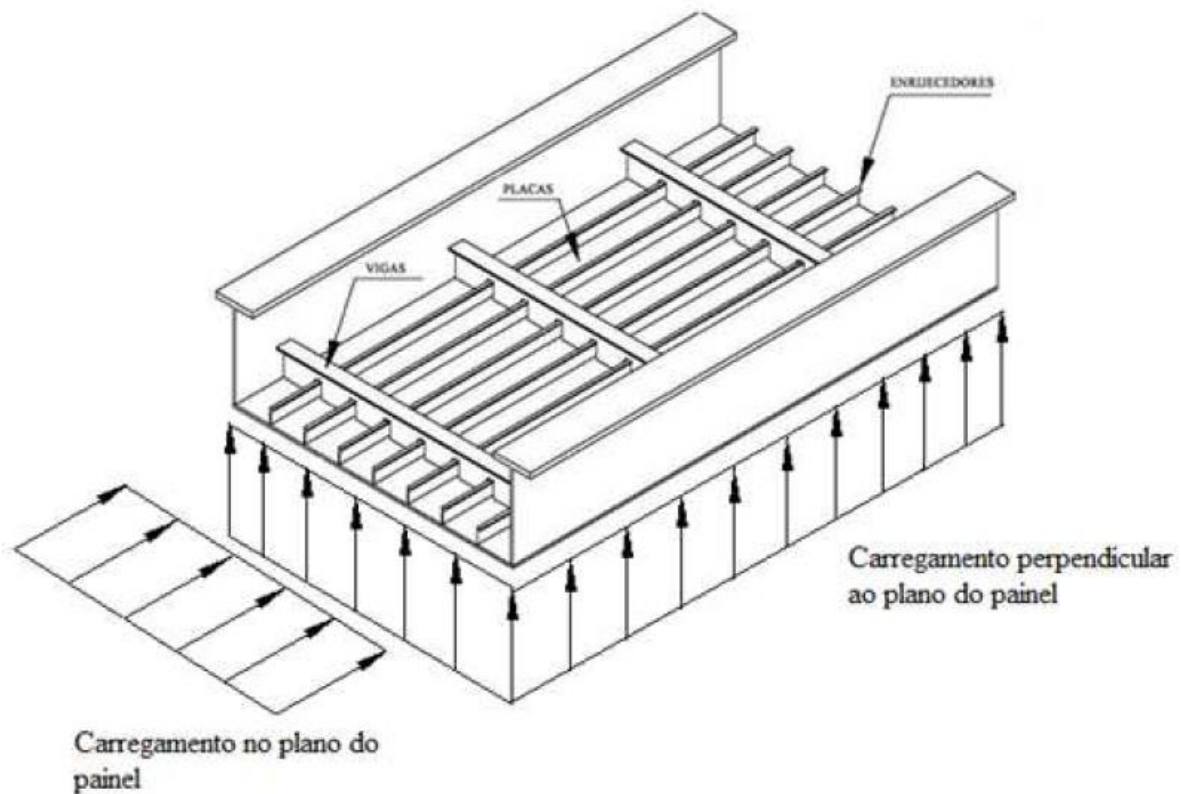


Fonte: Orozco (2009).

Os painéis reforçados, além de garantir estanqueidade e transmitir cargas à estrutura do navio, fornecem rigidez estrutural no sentido longitudinal e transversal (OROZCO, 2009).

Segundo De Souza (2009), Um painel enrijecido é composto basicamente por placas, enrijecedores e vigas, compondo a alma ou a mesa de uma viga, o casco de um navio, partes de vigas caixão, entre outras estruturas, podendo estar sujeito a solicitações em seu plano ou perpendiculares a este. A Figura 12 ilustra os elementos de um painel enrijecido.

Figura 12. Elementos e solicitações em um painel enrijecido



Fonte: DNV, 2002.

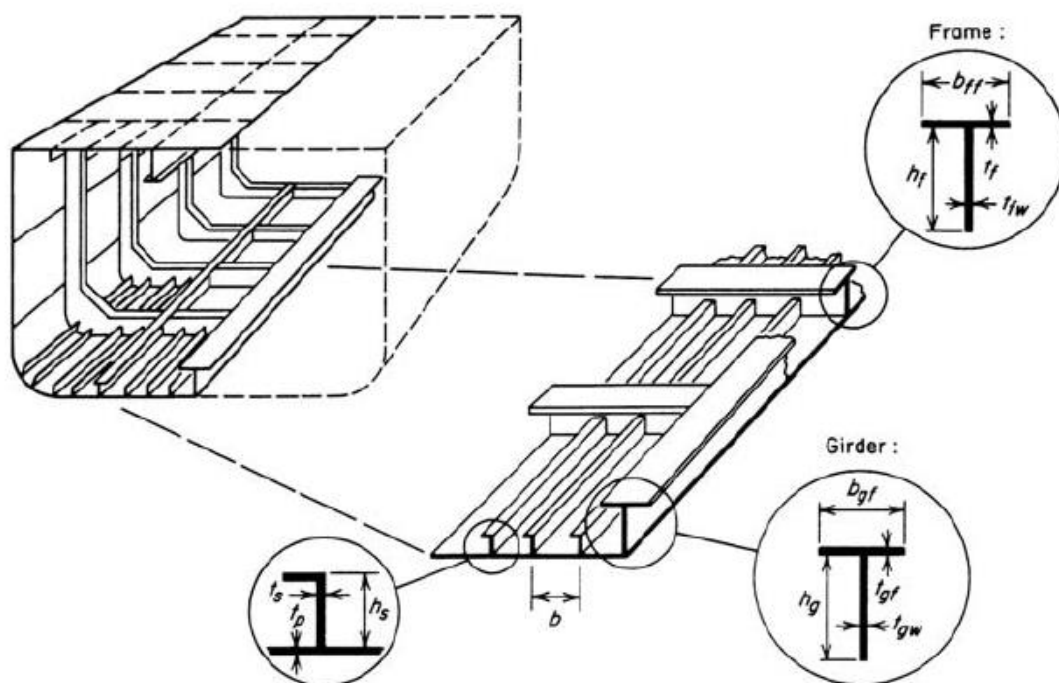
2.2. Aplicações

Os painéis reforçados com conectores longitudinais têm aplicações numa vasta gama de mercados. As indústrias aeroespacial e aeronáutica, ver Figura 12, foram uma das primeiras a utilizar painéis, por causa da sua capacidade de absorção de energia. Nestas indústrias, os painéis são geralmente constituídos por núcleos em forma de favos de mel e são aplicados em painéis solares, na estrutura de satélites e na estrutura principal, pavimentos e divisórias interiores de aviões. Na indústria marítima, são usados painéis com núcleos de favos de mel, de balsa e espuma. Relativamente à indústria de transportes, particularmente na indústria automóvel, este sistema é aplicado cada vez com maior frequência. São também aplicados em veículos ferroviários e rodoviários. Os painéis podem ainda ser utilizados em estruturas petrolíferas de extração e em plataformas de gás. A indústria eólica utiliza painéis nas pás dos moinhos de vento e nas cabines das turbinas. Também o desporto

é outro dos campos de aplicação destes materiais, de que são exemplo as bicicletas ou as pranchas de surf (Almeida, 2009).

Na indústria da construção, os painéis são usados como elementos estruturais em pontes rodoviárias, passadiços e na reabilitação ou na substituição de pontes de concreto (Almeida, 2009). No ramo da construção, os painéis foram desenvolvidos para uma grande variedade de aplicações que incluem revestimentos, fachadas e coberturas. Os painéis são encontrados numa variedade de estruturas, incluindo edifícios residenciais, escolas, edifícios de escritórios, ambientes de baixa temperatura, ambientes controlados, armazéns, edifícios industriais, instalações de justiça e hospitais (PCI, 2011).

Figura 13. Painel reforçado como parte estrutural de um navio.



Fonte: Orozco (2009).

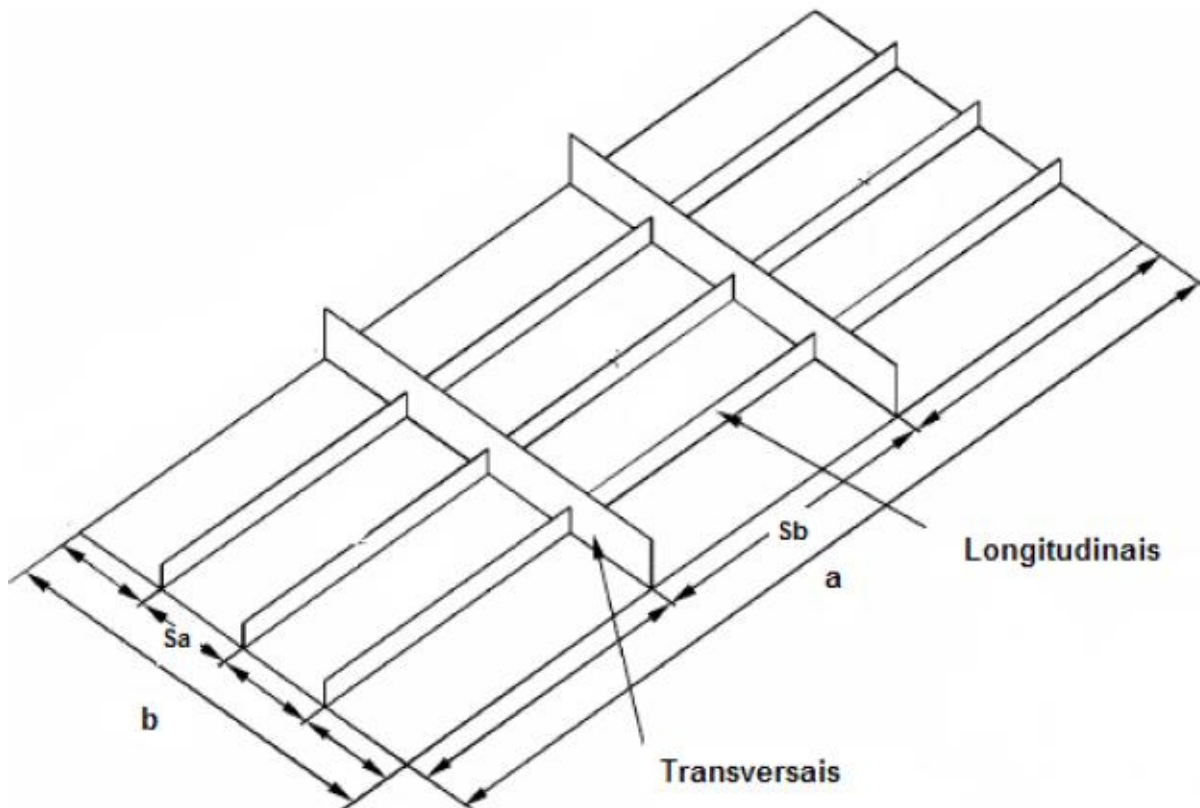
2.3. Estudos Numéricos

2.3.1. Método de Elementos Finitos (MEF)

Orozco (2009) fez uma análise numérica de painéis reforçados sobre métodos convencionais como o método da chapa ortotrópica sendo este um método muito

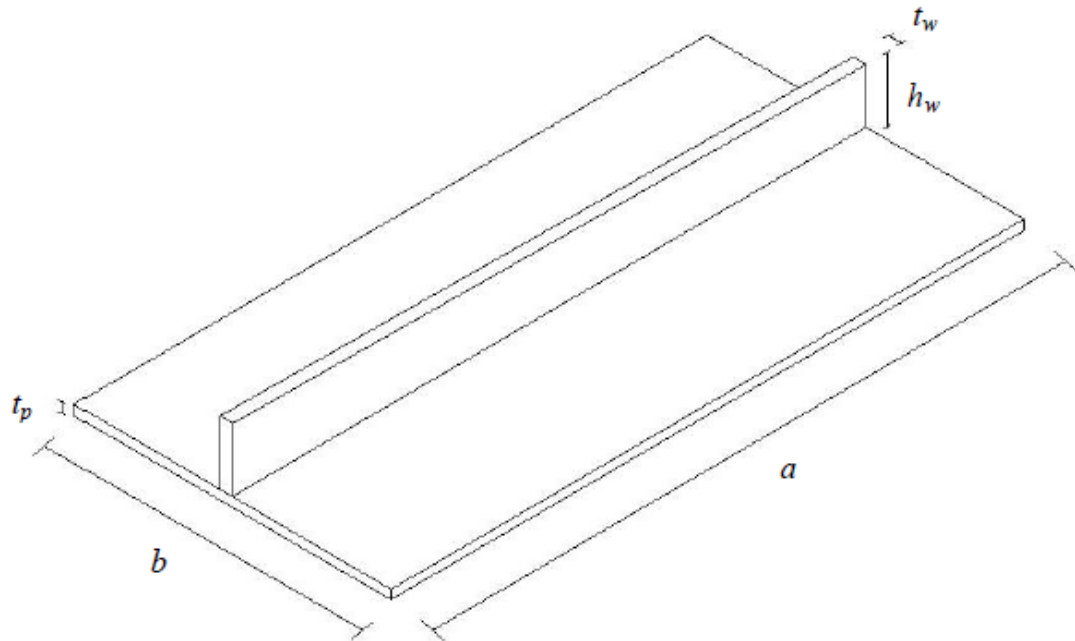
utilizado devido a sua simplicidade e realizou uma comparação entre este método e o Método de Elementos Finitos (MEF) para ter a acurácia do método em relação ao MEF. O tipo de elemento analisado dentro da pesquisa do Orozco é um painel do tipo mostrado na Figura 14.

Figura 14. Painel reforçado com estrutura ortogonal.



Fonte: Orozco (2009).

Os painéis quando submetidos a diferentes cargas que podem sofrer tração ou compressão. Os painéis mais esbeltos sofrem os efeitos da flambagem. Devido a este fenômeno Rackow (2015), desenvolveu um estudo numérico de um painel formado por uma chapa plana retangular de comprimento a , largura b e espessura t_p com um enrijecedor longitudinal de altura h_w e espessura t_w posicionado em $b/2$, conforme a Figura 15.

Figura 15. Geometria do painel Rackow.

Fonte: Rackow et al (2015).

Esse painel reforçado estudado na pesquisa de Rackow *et al* (2015), simplesmente apoiado, foi modelado no software ANSYS®, utiliza-se o Método de Elementos Finitos (MEF). As análises são feitas variando os parâmetros em torno de um modelo. O modelo realizado conclui que a presença de enrijecedores aumentou a tensão crítica de flambagem da placa em 62,14%, confirmando a importância do uso de reforços em placas planas e sua eficiência para aumentar a resistência dos painéis.

CAPITULO 3 FUNDAMENTAÇÃO DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Neste capítulo apresenta-se estudar a teoria envolvida atrás do fenômeno instabilidade estrutural. Inicialmente se faz uma breve demonstração das definições de instabilidade estrutural. Posteriormente se aborda o tópico da teoria geral da estabilidade elástica. Finalmente, com a teoria da instabilidade estrutural se apresenta o fenômeno de instabilidade de chapas e colunas delgadas.

3.1. Instabilidade estrutural: definições

Segundo Kzam (2016) define-se instabilidade estrutural como a mudança entre configurações de equilíbrio devido a ação de uma alteração no sistema. Um sistema só pode ter configuração estável ou instável. Se o sistema em questão deixa de ser estável, então, diz-se que o limite de instabilidade foi atingido. O ponto que diferencia uma configuração de estável e instável é denominado ponto crítico.

Quando pequenas alterações no sistema causam pequenas mudanças nas configurações de equilíbrio, é considerado equilíbrio estável, caso contrário diz-se que o sistema encontrasse em equilíbrio instável.

Não se deve confundir a denominação de instabilidade com o conceito clássico de flambagem, o primeiro refere-se a perda de estabilidade de um sistema no sentido mais amplo da terminologia. No caso da flambagem a estrutura é considerada ideal, i.e., um sistema livre de imperfeições.

A análise da instabilidade de uma estrutura, pode ser classificada enquanto aos tipos de problemas:

- a) Problemas de primeira espécie: Neste grupo encontrasse estruturas isentas de imperfeições geométricas ou físicas, portanto a qualquer perturbação o sistema alcançará a carga crítica, causando assim a instabilidade da estrutura. Como exemplo temos o problema de flambagem clássico.
- b) Problemas de segunda espécie: Neste grupo as estruturas têm imperfeições físicas e geométricas (estruturas reais), ou estruturas ideais com carregamento excêntrico. Neste grupo a trajetória de equilíbrio varia gradualmente até um ponto em que pequenos acréscimos de carga na estrutura, responde com deformações consideráveis.

- c) Problemas de terceira espécie: Também conhecido como problema de ponto limite, acontece quando um ponto encerra uma sucessão de configurações de equilíbrio sem o aparecimento de pontos de bifurcação

Segundo REIS e CAMOTIM (2001), a análise da terceira ordem da instabilidade do sistema estrutural depende da complexidade introduzida pela não linearidade. Nesses casos, o traçado da trajetória de equilíbrio se reduz a um número limitado de problemas elementares e soluções mais gerais devem ser tratadas a luz das análises aproximadas, como o método dos elementos finitos.

Acompanhar a trajetória de equilíbrio não-linear das estruturas é uma maneira eficiente de identificar a ocorrência de pontos críticos. Variando-se o parâmetro de carregamento é possível quantificar o nível de solicitação capaz de produzir um estado crítico.

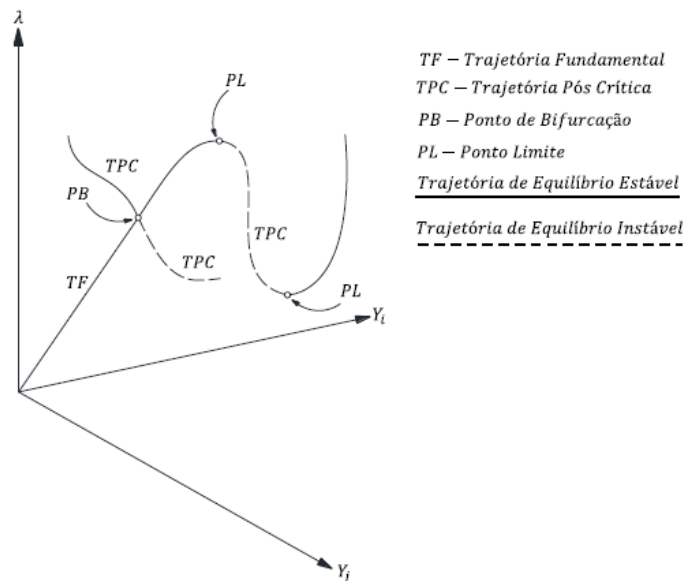
Os pontos críticos quando ocorrem nessa trajetória limitam a natureza do equilíbrio, e de acordo com suas características são classificados em pontos limites ou de bifurcação. Esses pontos identificam tipos de instabilidade, denominados respectivamente: instabilidade bifurcacional ou instabilidade de primeira espécie (ou simplesmente flambagem) e a instabilidade por ponto limite ou instabilidade de segunda espécie (KZAM, 2016).

No ponto de bifurcação as configurações de equilíbrio estáveis deixam de ser únicas. Para além do ponto de bifurcação as possíveis configurações de equilíbrio passam a ser de natureza estável ou instável e a esse ponto associa-se um valor denominado, carga crítica.

A instabilidade por ponto limite ocorre devido a presença de um ponto que encerra uma sucessão de configurações de equilíbrio sem o aparecimento de pontos de bifurcação. Para além desse ponto, a natureza das configurações altera-se de estáveis para instáveis.

Na Figura 16 ilustram-se pontos críticos na trajetória fundamental de equilíbrio, caracterizando-se também a estabilidade das trajetórias pós-críticas.

Figura 16. Trajetórias de equilíbrio da estrutura



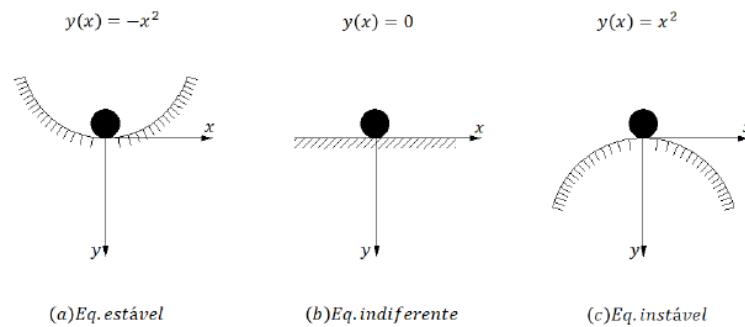
Fonte: Kzam, 2016

3.2. Teoria geral da estabilidade elástica

O fenômeno da instabilidade de uma estrutura pode ser estudado a partir de diferentes pontos de vista, empregando-se as equações de equilíbrio (estudo vetorial), ou através do critério da energia potencial estacionária (formulação escalar) (SIMITSES e HODGES, 2006).

Segundo Reis e Camotim (2001), a estabilidade de uma estrutura sempre está relacionada ao conceito de equilíbrio. Supondo que uma estrutura sofre a ação de forças externas, como consequência ela apresenta uma configuração de equilíbrio que é caracterizado pela deformação dos seus pontos. A estrutura será considerada estável se após uma pequena perturbação das forças externas a estrutura volta para sua posição original, caso contrário a estrutura considera-se instável.

A noção de estabilidade pode ser melhor entendida através da ilustração do exemplo clássico de um sistema mecânico elementar, representado por uma esfera sujeita a ação gravitacional e restrita a vínculos de natureza puramente cinemática, como mostrado na Figura 17.

Figura 17: Instabilidade do equilíbrio

Fonte: Kzam, 2016

De maneira intuitiva pode-se afirmar:

- I. Na **Figura 17(a)** a esfera consegue regressar a sua posição inicial para qualquer perturbação externa, esta condição é satisfeita pela conexão que existe com a superfície côncava: equilíbrio estável.
- II. Na **Figura 17(b)** a esfera alcança uma nova configuração de equilíbrio em um local distinto a inicial, quando sofre a ação de forças externas: equilíbrio indiferente.
- III. Na **Figura 17(c)** a esfera nunca mais voltara para sua posição inicial de equilíbrio para qualquer perturbação externa, esta condição explica-se pelo vínculo da superfície convexa: equilíbrio instável.

Conclui-se que o equilíbrio do sistema mecânico é estável quando representa uma condição de mínimo local, caso (a). O equilíbrio é neutro ou indiferente quando a esfera permanece no trecho horizontal, caso (b). No caso (c) o equilíbrio é instável e a posição da esfera representa um ponto de máximo local na expressão da energia potencial (KZAM, 2016).

Na análise feita o sistema possui apenas um grau de liberdade, sendo este não aplicável para a resolução de problemas mais complexos da engenharia. Kzam (2016) afirma que para a generalização desses conceitos para sistemas estruturais com vários graus de liberdade devesse cumprir a seguinte desigualdade.

$$\det(\mathbf{H} - \lambda \mathbf{I}) > 0 \quad \text{Eq (1)}$$

Onde H é uma matriz $n \times n$, denominada matriz Hessiana, que representa a segunda variação da energia potencial e também é uma forma quadrática das coordenadas generalizadas, I é a matriz Identidade $n \times n$ e λ representa os autovalores.

Se a condição é satisfeita diz-se que o equilíbrio é estável, caso contrário, o equilíbrio é instável. No caso que a forma quadrática é nula, ela é caracterizada como uma condição de equilíbrio crítico, a onde não pode ser dito nada sobre a estabilidade do equilíbrio.

Cada autovalor positivo da equação (1) é entendido como a rigidez que deve ser retirada, segundo um determinado grau de liberdade, para que a estrutura experimente uma situação de equilíbrio crítico. Enquanto, a ocorrência de autovalores negativos equivale a necessidade de se acrescentar molas desacopladas (rigidez) segundo os graus de liberdade, para que a estrutura retorne à condição de equilíbrio crítico.

3.3. Análise Linear de Estabilidade

Para sistemas estruturais com carregamento conservativo verifica-se que a matriz Hessiana é uma forma quadrática positivo-definida. Considerando-se ainda a hipótese de comportamento elástico-linear do material, a Hessiana torna-se simétrica. A análise linear de estabilidade consiste na determinação do parâmetro de carga para o qual a estrutura ou elemento estrutural perde estabilidade devido a ocorrência de pontos de bifurcação na trajetória de equilíbrio. O cálculo desse parâmetro é obtido, de maneira geral, a partir de um problema generalizado de autovalores, dado por:

$$(K_T - \lambda K_G)\Lambda = 0 \quad \text{Eq (2)}$$

Sendo K_T , a matriz de rigidez tangente numa configuração de equilíbrio estável. Quando esta configuração é tomada em relação ao estado inicial da estrutura descarregada sem imperfeições na geometria e no material, diz-se que a condição de instabilidade é denominada de análise de Euler, (MEIRELLES e PIMENTA, 1995) e a matriz de rigidez tangente é semelhante a matriz de rigidez linear K_L ,

A matriz K_G , é a matriz de rigidez geométrica obtida assumindo-se a condição de pequenos deslocamentos proporcionais ao carregamento. A condição limite de estabilidade corresponde a determinação do menor fator de carga λ capaz de produzir deslocamentos indeterminados na estrutura. Essa condição é equivalente ao cálculo

do menor autovalor λ . Os valores Λ correspondem as configurações deslocadas da estrutura calculadas por meio dos autovetores do problema.

Para a condição de pequenas cargas e pequenos deslocamentos, a carga crítica é obtida por meio da combinação:

$$F_{cr_i} = \lambda_i F_{ext} \quad \text{Eq (3)}$$

Sendo F_{cr_i} o vetor com as cargas críticas correspondente a cada autovalor λ_i . O vetor F_{ext} é o carregamento de referência, sendo a própria carga que atua na estrutura.

Embora o fenômeno de instabilidade ocorra com a interação entre diferentes modos é possível caracteriza-lo adequadamente para se avaliar a eficiência da estrutura, propondo-se medidas a fim de evita-los.

A forma como se manifestam os modos de instabilidade dependem de fatores como: vinculação, geometria da seção e comprimento da peça. De maneira geral, classifica-se a instabilidade como de natureza global quando ocorre a perda de estabilidade da estrutura. Em elementos estruturais de chapa delgada, as formas globais estão associadas aos chamados modos de flexão, modos de torção e modos de flexotorção.

Os modos globais se caracterizam por não apresentarem deformações significativas da seção transversal, deformando-se quase que exclusivamente devido a movimentos de corpo rígido da estrutura.

A instabilidade global, pode-se caracterizar a instabilidade global de um elemento estrutural como sendo as deformações devido à instabilidade que ocorrem sobretudo no eixo longitudinal da peça que compõem a estrutura. As deformações da seção transversal, nesse caso, podem ser consideradas desprezíveis.

Por sua vez, as formas de instabilidade local estão associadas as deformações locais e distorcionais das chapas. Nesse caso, a seção transversal se deforma sem apresentar deslocamentos significativos no eixo da barra (REIS e CAMOTIM, 2001) e as chapas podem apresentar deformações tanto no plano como fora do plano da seção transversal.

3.4. Flambagem de Chapas, Flanges e Colunas Delgadas

De acordo com (REIS e CAMOTIM, 2001) a geometria bidimensional da chapa proporciona um acréscimo na capacidade resistente devido ao efeito de membrana.

Esse acréscimo promove a redistribuição das tensões às partes mais enrijecidas permitindo que a mesma continue suportando o carregamento, mesmo após a ocorrência de instabilidade local. Esse fenômeno é evidente em chapas delgadas.

As chapas esbeltas submetidas a tensões compressivas perdem estabilidade com valores de carga abaixo do limite de resistência, porém essa condição não implica em esgotamento da capacidade resistente e a redistribuição das tensões devido ao efeito de membrana pode ser considerada uma reserva de resistência pós-crítica.

Em (TIMOSHENKO e GERE, 1961) é demonstrada a expressão da energia potencial total para uma chapa simplesmente apoiada e submetida a um carregamento unidirecional aplicado na superfície média. O valor da energia potencial total é obtida por:

$$\Pi = \frac{\pi^4 ab}{8} D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) - \frac{\pi^2 b}{8a} P \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} m^2 A_{mn}^2 \quad \text{Eq (4)}$$

Na configuração de equilíbrio a energia potencial total é estacionária e o valor da carga crítica é calculado por meio de um problema geral de autovalor. A carga crítica em pequenos deslocamentos para materiais isotrópicos e elástico-lineares é calculada como:

$$P_{mn} = D \frac{\pi^2 a^2}{m^2} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \quad \text{Eq (5)}$$

Sendo, $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ a rigidez a flexão; a, b e t, a largura, o comprimento e a espessura da chapa, respectivamente.

Na equação (5) o carregamento é uma função das dimensões, das propriedades do material e do número de semi-ondas no plano da chapa. O valor da carga crítica será aquele no qual as semi-ondas são obtidas para o estado menos energético de deformação. Essa situação ocorre para $n = 1$, ou seja, uma única semi-onda na direção transversal da chapa (REIS e CAMOTIM, 2001). Tendo isso em conta, a equação (5) pode ser escrita da seguinte forma:

$$P_m = k \frac{D\pi^2}{b^2} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2, \text{ sendo } k = \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \quad \text{Eq (6)}$$

De acordo com a equação (6) o resultado da carga crítica depende de dois fatores, a carga crítica de Euler para uma faixa de largura unitária de comprimento a e da instabilidade de chapa, determinada pelo parâmetro k .

Segundo Kzan (2016), é possível verificar para placas longas, $a > 4b$, simplesmente apoiadas que o padrão de instabilidade consiste em semi-ondas quadradas iguais a largura da chapa. Para chapas com diferentes condições de vínculos e carregamentos é necessário se obter uma nova solução analítica, ou se proceder uma análise via método dos elementos finitos.

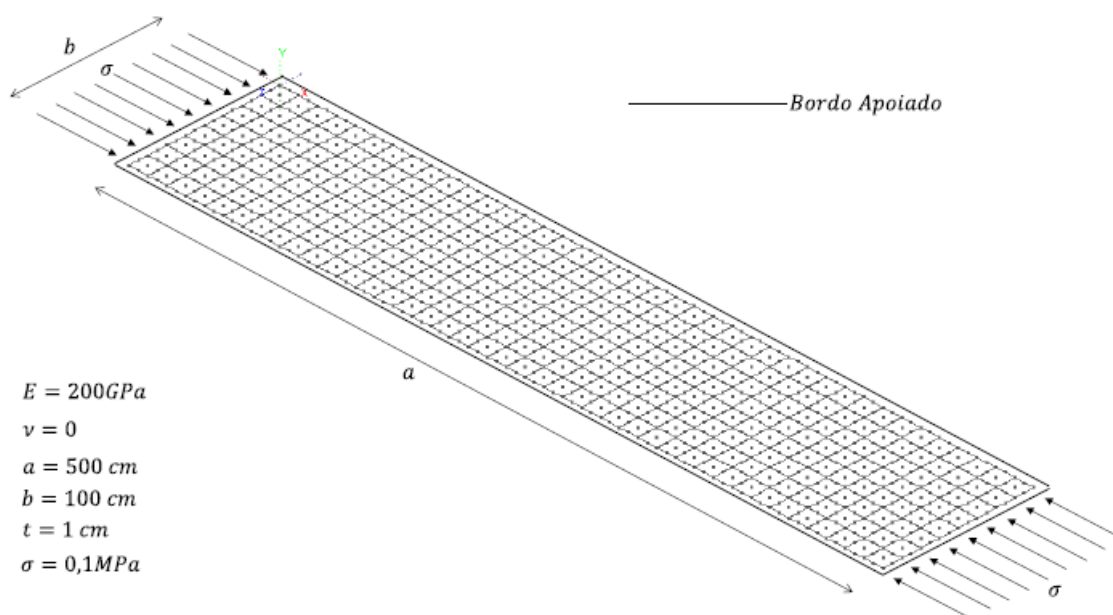
CAPITULO 4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS

Depois de fazer uma fundamentação teórica e revisão bibliográfica dos painéis reforçados, se apresenta neste capítulo um estudo numérico com o interesse de avaliar a carga crítica nos painéis com diferentes tipos de conectores longitudinais, avaliar a trajetória de equilíbrio de cada painel a ser simulado no software SAP 2000.

4.1. Modelos para validação da proposta

4.1.1. Modelo de chapa simplesmente apoiada

Inicialmente se faz uma comparação com o modelo desenvolvido por Kzam (2016) que emprega o elemento de casca não-linear geométrico posicional e se faz a comparação do modelo numérico desenvolvido no SAP 2000 verificando a adequação dos resultados em relação a solução analítica e numérica. O modelo desenvolvido por Kzam (2016) considera inicialmente uma placa delgada sob compressão uniforme, com os bordos simplesmente apoiados. Os apoios foram liberados na direção do eixo da aplicação da carga e foram restringidos nas outras direções, para que a placa possa gerar os modos de instabilidade local da chapa. O modelo em questão foi considerado na análise uma malha com 320 elementos quadrilaterais de aproximação quadrática, totalizando 9646 graus de liberdade com o elemento finito posicional de casca. conforme a Figura 18.

Figura 18. Chapa simplesmente apoiada sob compressão uniforme

Fonte: Kzam (2016).

Para desenvolver o modelo no SAP 2000, foi transformada a carga de tensão aplicada nas bordas mais curtas para cargas pontuais em cada nó dos elementos das bordas mais curtas para maior facilidade no ambiente do SAP 2000.

Na Tabela 1, apresentam-se os resultados dos seis primeiros pontos críticos:

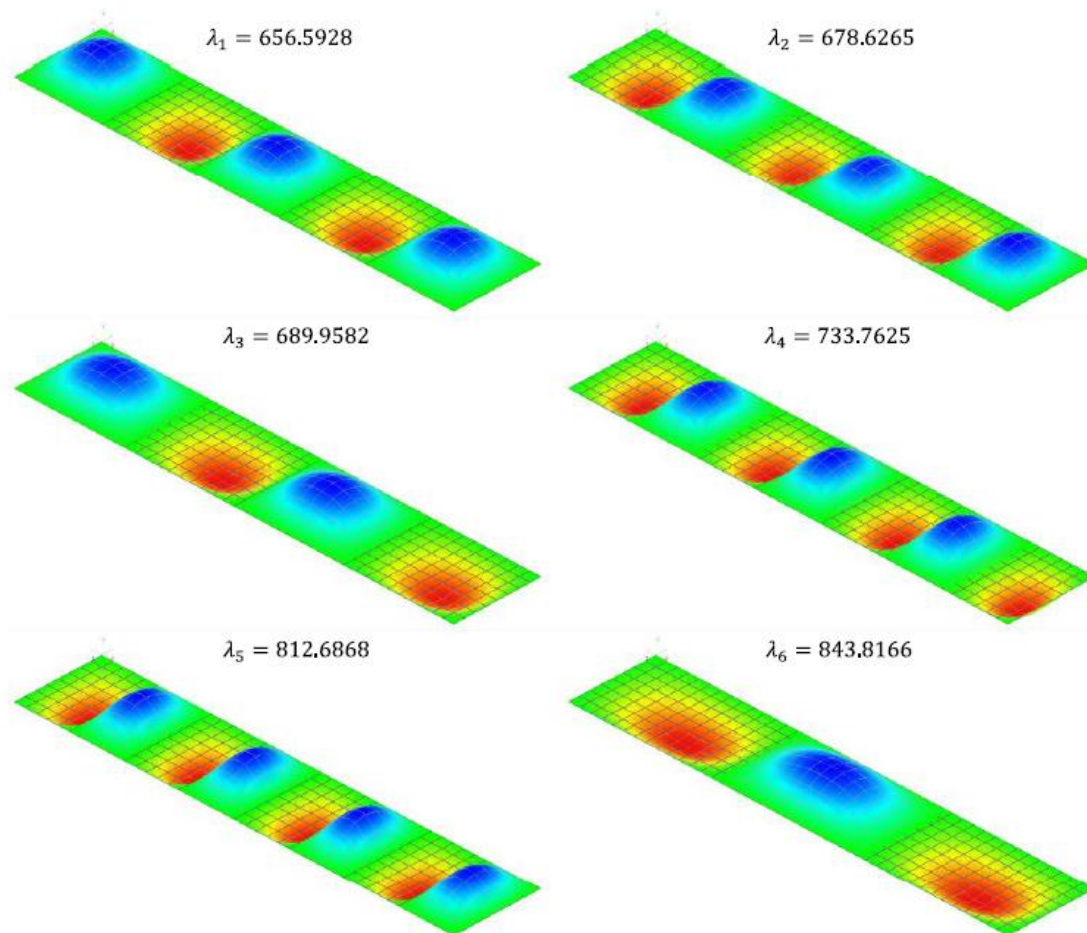
Tabela 1. Autovalores para a chapa simplesmente apoiada.

Modo	Modelo Proposto Kzam (2016)			Analítico-SAP2000	Numerico-SAP2000
	Analítico (KN)	Númerico (KN)	SAP2000 (KN)	Erro relativo (%)	Erro relativo (%)
1	657.97363	656.59286	647.89041	1.53%	1.33%
2	680.08885	678.62658	674.35706	0.84%	0.63%
3	691.28354	689.95826	685.59556	0.82%	0.63%
4	735.3191	733.76254	731.6029	0.51%	0.29%
5	814.34517	812.68684	813.90049	0.05%	0.15%
6	845.13057	843.81661	838.56927	0.78%	0.62%

É possível notar na Tabela 1, que o erro relativo do software SAP 2000 e o modelo numérico e analítico desenvolvido por Kzam (2016), apresentam um erro relativo consideravelmente aceitável. A resposta do software SAP 2000 ainda é mais rígida do que os outros modelos desenvolvidos. Também se pode comparar se os resultados coincidem com a resposta do modelo numérico desenvolvido por Kzam ver

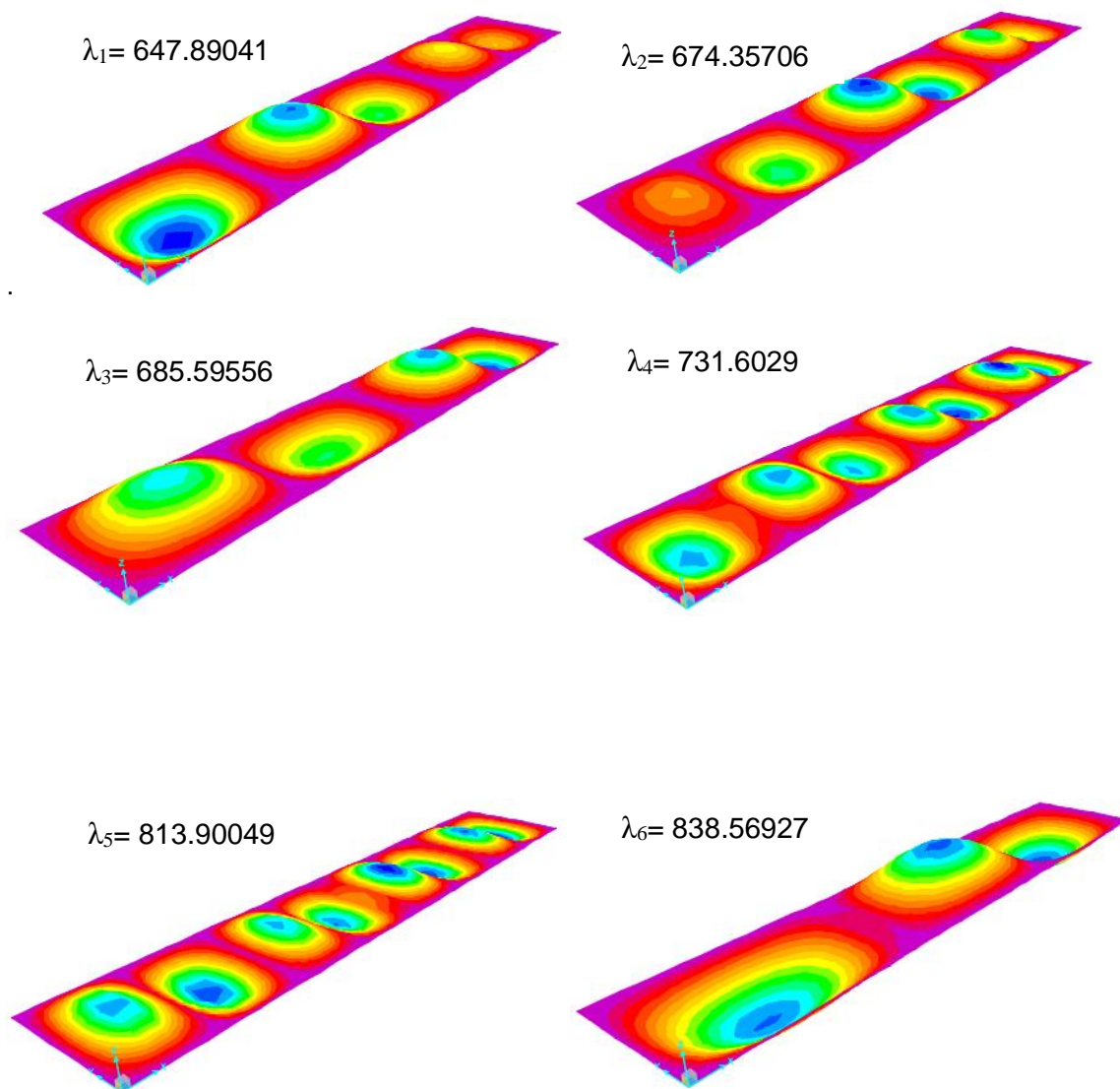
Figura 19, em relação à quantidade de semi-ondas que se formam na chapa principalmente no primeiro modo no qual apresenta cinco semi-ondas na direção longitudinal como pode-se esperar.

Figura 19. Modos de instabilidade local da chapa.



Fonte: Kzam (2016).

Os autovetores correspondentes aos modos de instabilidade obtidos com o SAP 2000 são mostrados na Figura 20.

Figura 20. Modos de instabilidade local de chapa do SAP 2000.

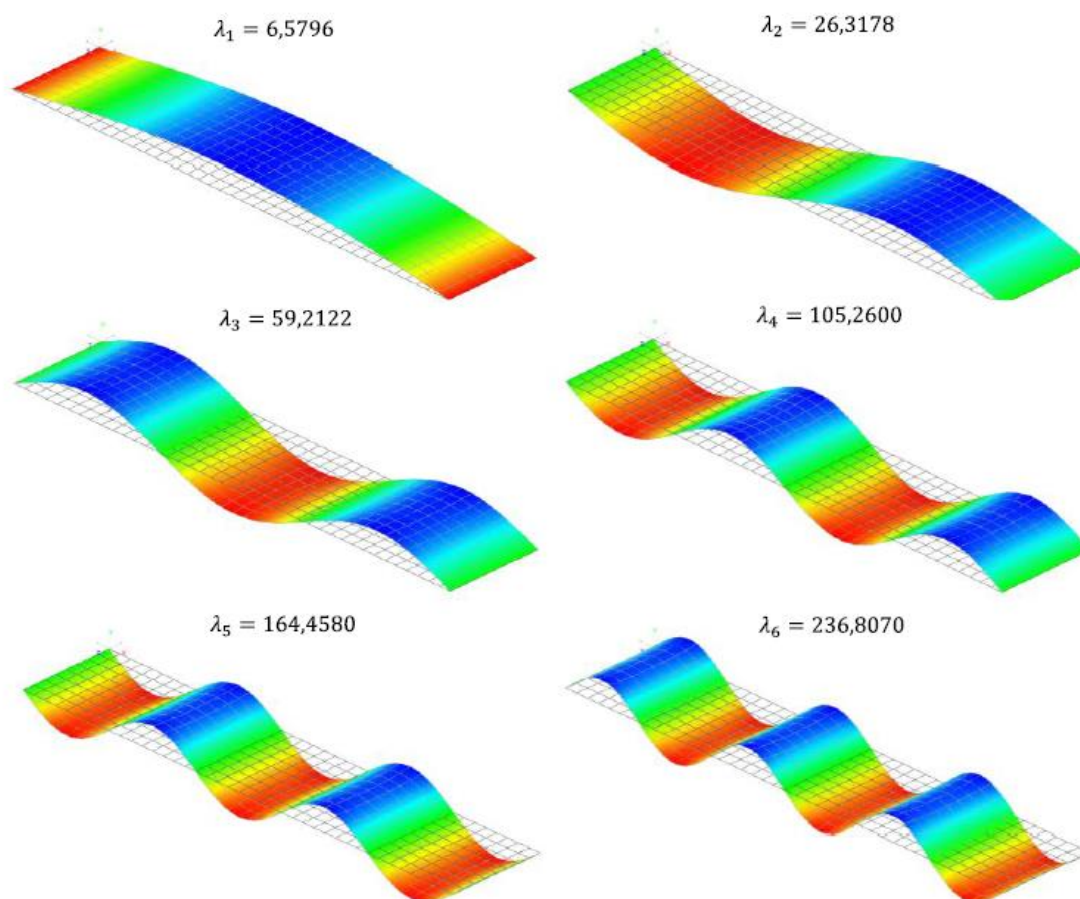
A partir da análise da Figura 20 verifica-se que foi possível encontrar as cargas críticas e seus respectivos modos de instabilidade local da chapa no software SAP 2000, tendo como base os resultados apresentados na Figura 19.

4.1.2. Modelo de coluna larga

Liberando os apoios das bordas maiores e deixando a estrutura apoiada nas bordas menores tem-se a estrutura denominada de coluna larga. Aplicando uma carga na borda menor igual a 0.1 MPa, pode-se obter os modos de instabilidade para o tipo

de estrutura chamada de coluna larga. Na Figura 21 é mostrado os seis primeiros autovalores obtidos por uma análise numérica e analítica feita por Kzam (2016).

Figura 21. Modos de flambagem a flexão da coluna larga.



Fonte: Kzam (2016).

Na Tabela 2, apresentam-se os resultados dos seis primeiros pontos críticos:

Tabela 2. Cargas de bifurcação da coluna larga.

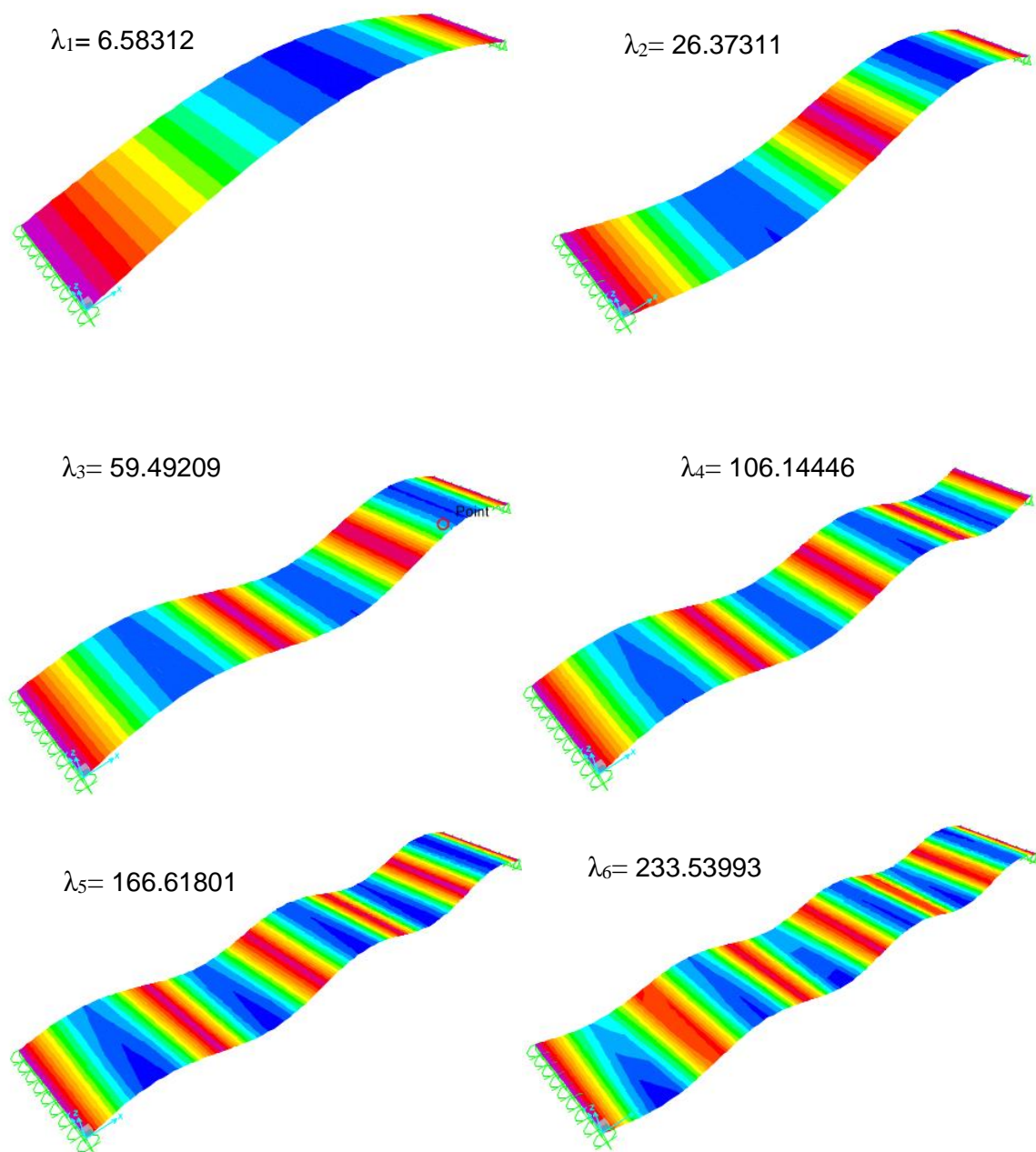
Modo	Modelo proposto Kzam (2016)		Analítico-SAP2000	Numerico-SAP2000	
	Analítico (KN)	Númerico (KN)	SAP2000 (KN)	Erro relativo (%)	Erro relativo (%)
1	6.5797	6.5796	6.58312	0.05%	0.05%
2	26.3189	26.3178	26.37311	0.21%	0.21%
3	59.2176	59.2122	59.49209	0.46%	0.47%
4	105.2758	105.26	106.14446	0.83%	0.84%
5	164.4934	164.458	166.61801	1.29%	1.31%
6	236.8705	236.807	233.53993	1.41%	1.38%

Pode-se observar na Tabela 2 que os valores apresentados do software SAP 2000 são muito próximos dos valores da análise analítica e numérica realizada por Kzam (2016). O erro relativo entre as cargas de bifurcação da coluna larga entre o

SAP 2000 e a análise numérica e analítica é aceitável, encontra-se na faixa do erro não muito grande.

Na Figura 22 mostra-se as configurações deformadas (autovetores) e os parâmetros de carga correspondentes (autovalores) para os modos de flexão da coluna do software SAP 2000.

Figura 22. Modos de instabilidade local de coluna larga do SAP 2000.



Para o primeiro modo de flambagem da chapa a geometria corresponde a um segmento sinusoidal com todas as ordenadas com um sinal positivo, que também

pode ser deformado para baixo (segmento sinusoidal com todas as ordenadas com sinal negativo). A ordenada representativa da geometria da deformação elástica é a deformação no centro da chapa.

Para o segundo modo de flambagem da chapa, a geometria corresponde a uma sinusoidal com 2 seções, uma das ordenadas negativas (metade esquerda) e a outra seção de ordenadas positivas (metade direita), que também pode ser deformada com sinais invertidos. As ordenadas representativas da geometria de deformação elástica são as deformações em um quarto da chapa, esquerda e direita; no meio da chapa, a deformação é zero.

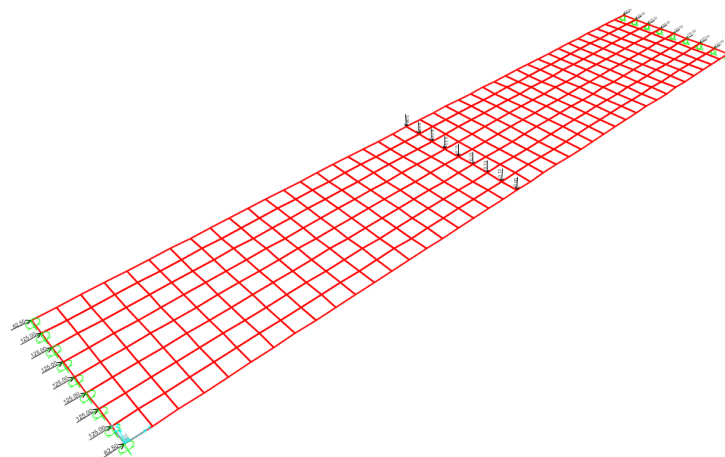
É necessário só o estudo do primeiro modo de flambagem das estruturas já que representa o colapso da estrutura para uma carga bem menor, já a partir do segundo modo de flambagem a deformação por flambagem passa a ser maior e os modos passam a ser teóricos e encontrar uma resposta pratica a estes modos de instabilidade é muito confuso, por isso que só interessa o estudo do primeiro modo de instabilidade da estrutura.

4.1.2.1. Análise dos dois primeiros modos de flambagem

Para obter o gráfico da trajetória de equilíbrio que mostra os deslocamentos dependendo o carregamento aplicado na estrutura se mostra o passo a passo da deformação da chapa.

Deformação devido a carga transversal mais as cargas axiais (ver Figura 23), detonante do primeiro modo de deformação por flambagem.

Figura 23. Cargas axiais e transversais que conduz a estrutura a condição de flambagem por flexão.



Nas figuras a seguir são plotadas as elásticas de deformação obtidas com controle de força que serão mostradas. Utilizaram-se passo de carga de 1kN para obter os deslocamentos.

Figura 24. Elástica da deformada para 0.10 carga axial e carga transversal.

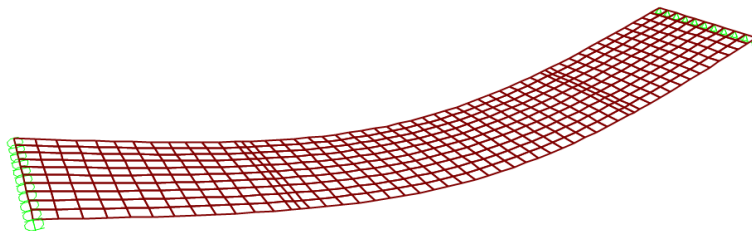


Figura 25. Elástica da deformada para 0.30 carga axial e carga transversal.

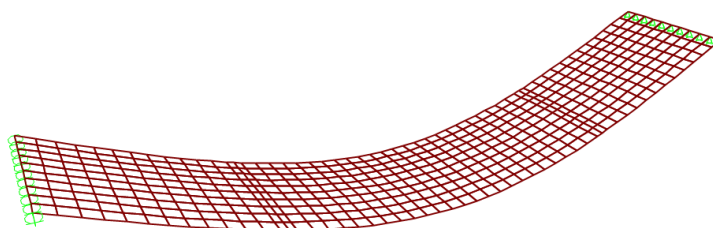


Figura 26. Elástica da deformada para 0.50 carga axial e carga transversal.

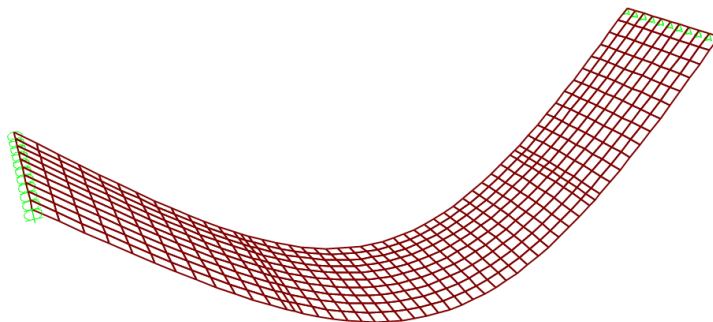


Figura 27. Elástica da deformada para 0.60 carga axial e carga transversal.

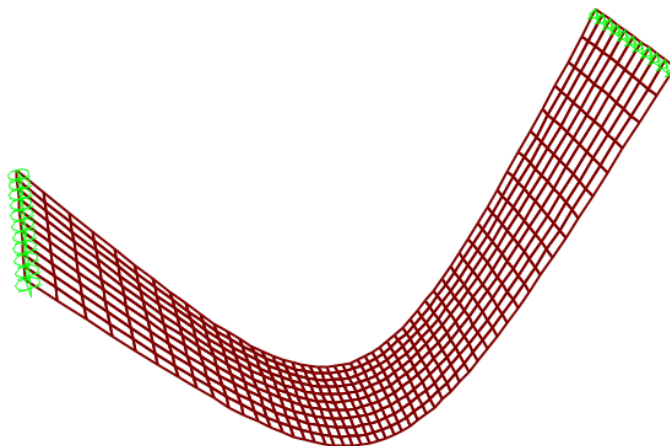
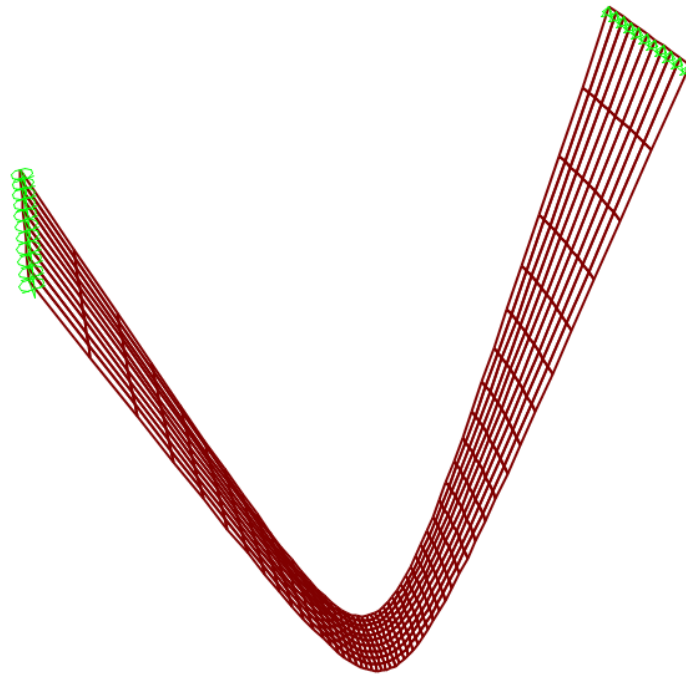
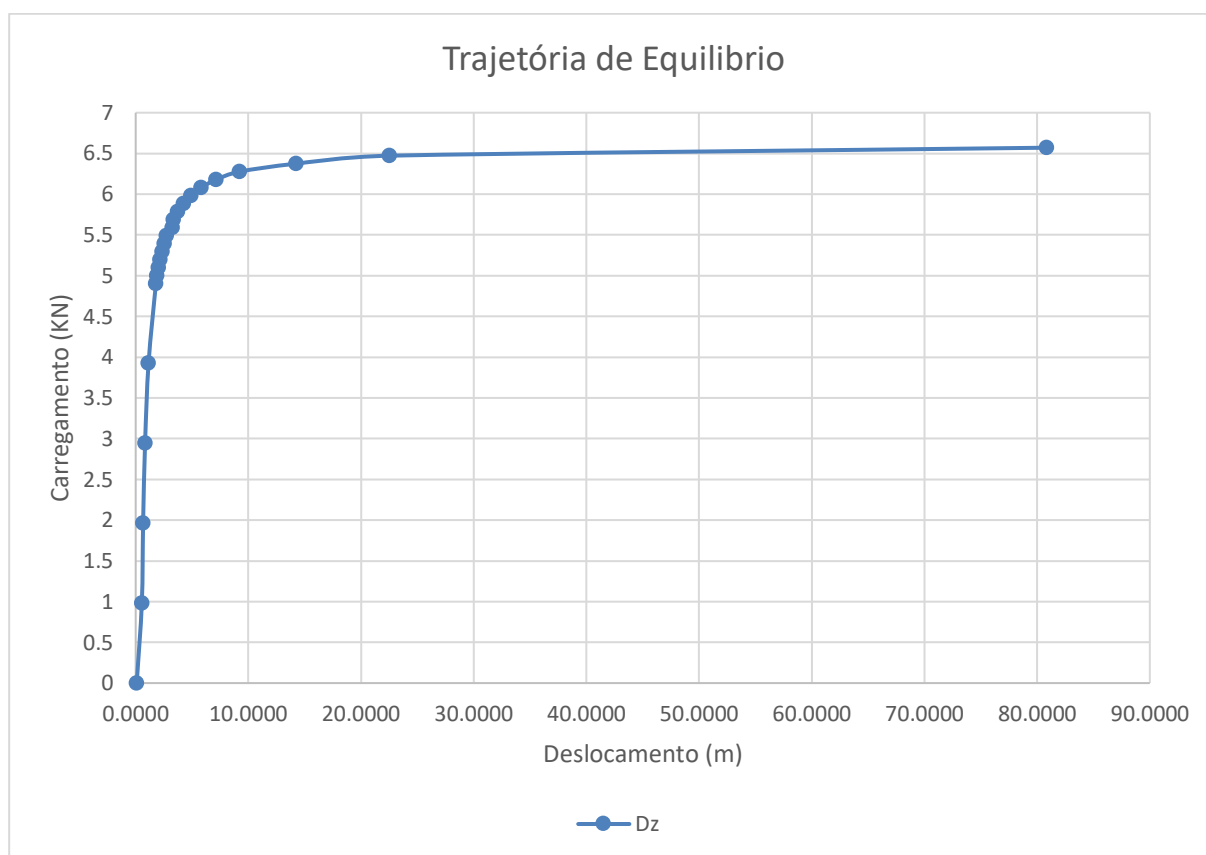


Figura 28. Elástica da deformada para 0.65 carga axial e carga transversal.



A estrutura está à beira do colapso devido ao encurvamento, uma vez que a carga crítica para o primeiro modo de encurvamento é de 6.57KN.

Na Figura 29, se observa a trajetória de equilíbrio da coluna larga, desta forma se confirma o valor da carga crítica do primeiro modo de flambagem $P_{cr1}=6.57$.

Figura 29. Trajetória de equilíbrio da coluna larga e primeiro modo de flambagem

Este modelo busca mostrar a influência das condições de apoio na estabilidade da estrutura. Essa característica é de grande relevância para o estudo da instabilidade dos painéis estruturais reforçados com conectores longitudinais, uma vez que essas peças são formadas pela composição de chapas delgadas e enrijecedores.

Na próxima seção a metodologia utilizada para determinar as cargas críticas dos painéis reforçados será a mesma metodologia para o cálculo das cargas críticas.

4.2. Modelos propostos desenvolvidos

Para entender quanto influencia a geometria do reforço no painel reforçado no valor da carga crítica serão feitos quatro modelos básicos de painel reforçado com conectores longitudinais, como foi indicado, que serão denominados de:

Modelo I: Painel reforçado com conectores longitudinais lisos.

Modelo II: Painel reforçado com conectores longitudinais furados.

Tanto no modelo I e no modelo II foi considerado uma variação no número de conectores longitudinais assim, foram criados mais dois modelos deferindo na quantidade de conectores e serão denominados de:

Modelo III: Painel reforçado com conectores longitudinais lisos triples.

Modelo IV: Painel reforçado com conectores longitudinais furados triples.

A modelagem foi feita no software SAP2000, o qual permitiu a análise dos painéis enrijecidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Todos os modelos numéricos são analisados quando sujeitos a esforços de flexão e são desenvolvidos com algumas características similares que são indicadas a seguir.

4.2.1. Geometria dos modelos

Os painéis analisados são formados por:

Painel:

Comprimento (a): 3000mm

Largura (b): 1000mm

Espessura (t_p): 6mm

Conectores longitudinais:

Comprimento (c): 3000mm

Altura (h_w): 120mm

Espessura (t_w): 2mm

4.2.2. Material

Para estudar o comportamento da estrutura, se consideram as seguintes propriedades necessárias para a determinação das simulações numéricas o Módulo de Young (E) e o Coeficiente de Poisson (ν). Sendo este último nulo, como se mostra na tabela 3.

Tabela 3. Propriedades dos materiais usados para a simulação do painel.

Elemento	Modulo de Elasticidade	Unidade
Painéis	200	GPa
Conectores	200	GPa

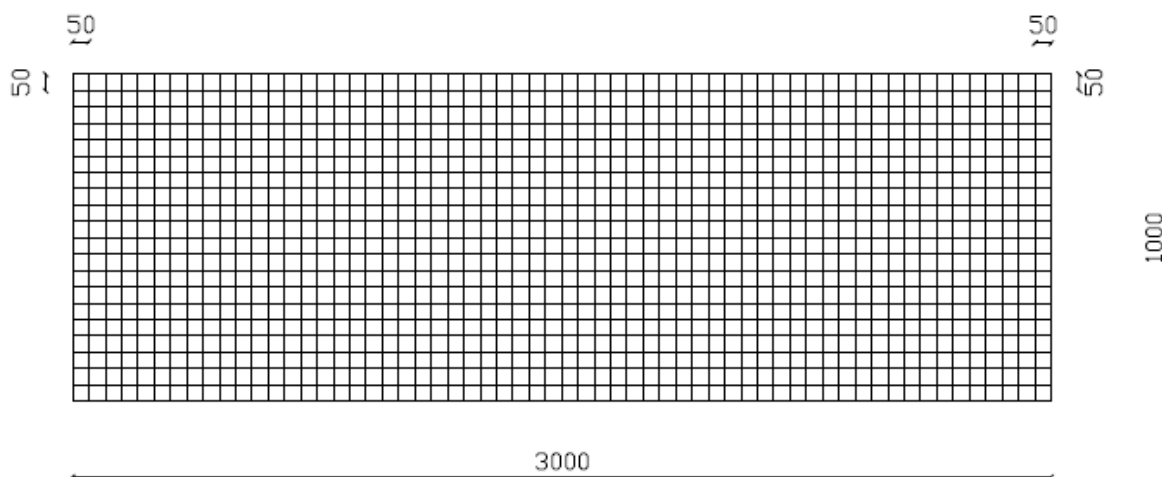
4.2.3. Definição da malha

Optou-se por fazer um modelo simples do painel reforçado somente usando elementos finitos do tipo casca. Os elementos do tipo casca foram utilizados tanto nos painéis e nos conectores.

A malha de elementos finitos dos painéis completos com conectores é composta por 2640 elementos finitos quadrados. A malha foi definida dessa forma devido ao carregamento a ser colocado no conjunto, para evitar que os nós dos conectores fiquem perdidos na malha dos painéis.

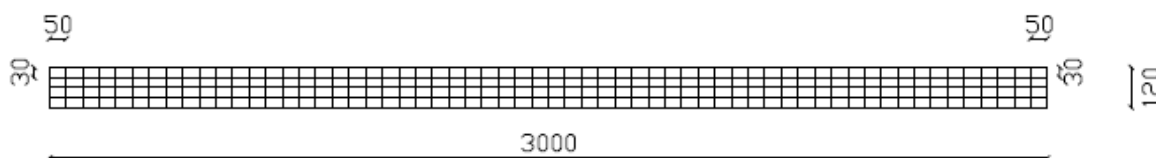
A disposição da malha de elementos finitos para os painéis tanto de cima como de baixo é mostrada na Figura 30. Optou-se por escolher as dimensões dos elementos finitos dos painéis de cima e de baixo como sendo 50 mm de largura e 50 mm de comprimento

Figura 30. Configuração da malha de elementos finitos adoptada para os painéis, medidas em mm.



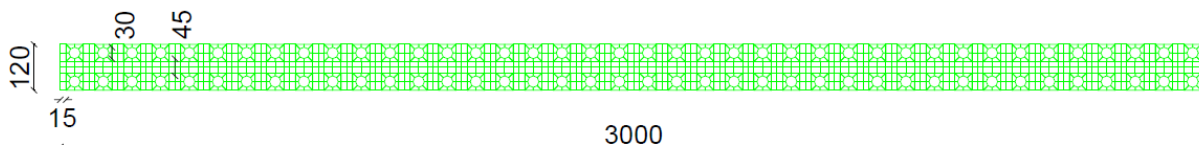
A dimensão dos elementos finitos dos conectores longitudinais lisos escolheu-se como sendo de 50 mm de comprimento e 30 mm de largura, como ilustrado na Figura 31.

Figura 31. Disposição da malha de elementos finitos adoptada para os conectores, medidas em mm.



A dimensão dos elementos finitos dos conectores longitudinais furados escolheu-se como sendo a ilustrada na Figura 32.

Figura 32. Disposição da malha de elementos finitos adoptada para os conectores, medidas em mm.

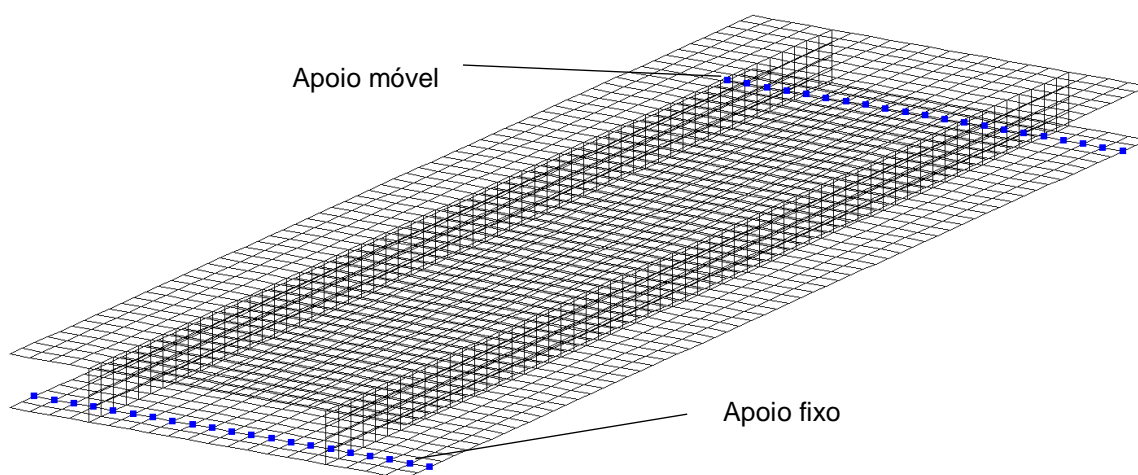


Estas medidas foram adotadas para uma maior facilidade de locar os nós onde serão localizados os apoios e as cargas do painel ensaiado. Seguidamente pode ser observada a malha de elementos finitos para cada componente do painel criada. A malha com os elementos de casca é ilustrada na Figura 33.

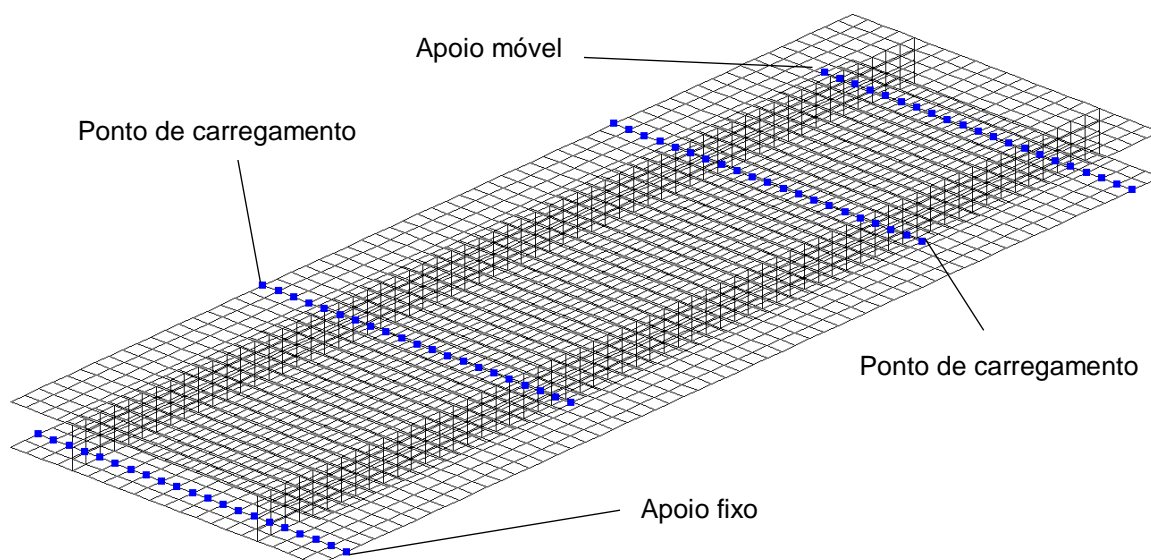
4.2.4. Configuração de carregamento

Os pontos azuis mostrados na Figura 33 são nós especiais o que significa os pontos dos apoios. A figura indica os tipos de apoios que foram utilizados na simulação numérica.

Figura 33. Malha inteira dos painéis com conectores longitudinais lisos.



A carga vertical externa foi simulada por duas forças de linha aplicadas na superfície superior da camada do painel superior, conforme esquematicamente representado na Figura 34. A disposição das cargas nos painéis foi a mesma em todos os modelos numéricos desenvolvidos no SAP 2000.

Figura 34. Disposição do carregamento na malha dos painéis com conectores longitudinais.

O deslocamento vertical dos nós alinhados correspondentes aos suportes foi restringido. Para os nós correspondentes a um dos suportes, o deslocamento horizontal também foi restringido.

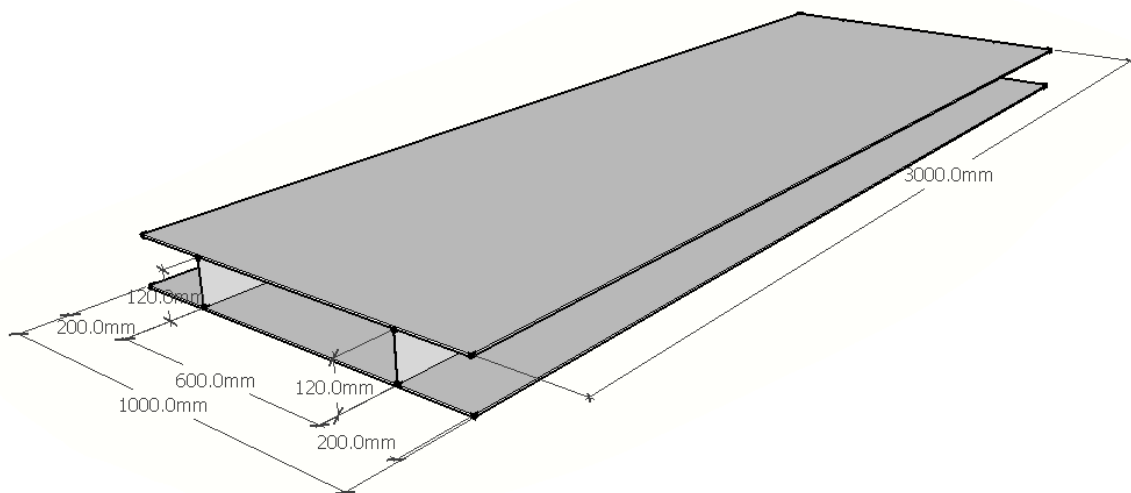
4.4. Determinação da carga crítica.

A influência dos conectores longitudinais com diferentes geometrias e com uma variação da quantidade destes afetam na carga crítica no tipo de painéis estudados. Para isto, são modelados quatro painéis no software SAP 2000, os quais são apresentados a seguir.

4.4.1. Modelo I: Painel reforçado com conectores longitudinais lisos.

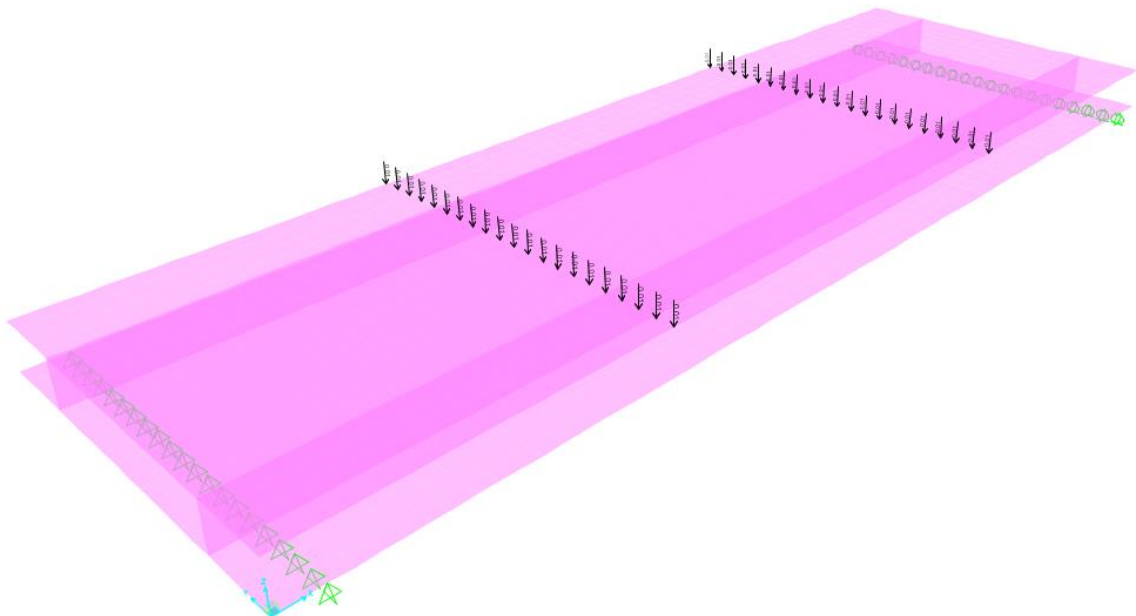
Trata-se de um painel submetido a flexão pura, simplesmente apoiado. Pode-se verificar que no tipo de carregamento utilizado na modelação computacional que ele influência de certa forma como sendo uma imperfeição. Na Figura 35 se pode mostrar as características do modelo.

Figura 35. Disposição do painel com conectores longitudinais lisos.



Pode-se observar na Figura 35 que o painel do modelo I consta principalmente de dois chapas e dois conectores lisos localizados a uma distância constante sendo está de 600mm. Na Figura 36 mostra-se a configuração do modelo com o tipo de carga e as condições de apoio. As cargas são perpendiculares à placa tendo uma distância entre elas de 1200mm o que causa flexão pura no painel com conectores reforçados.

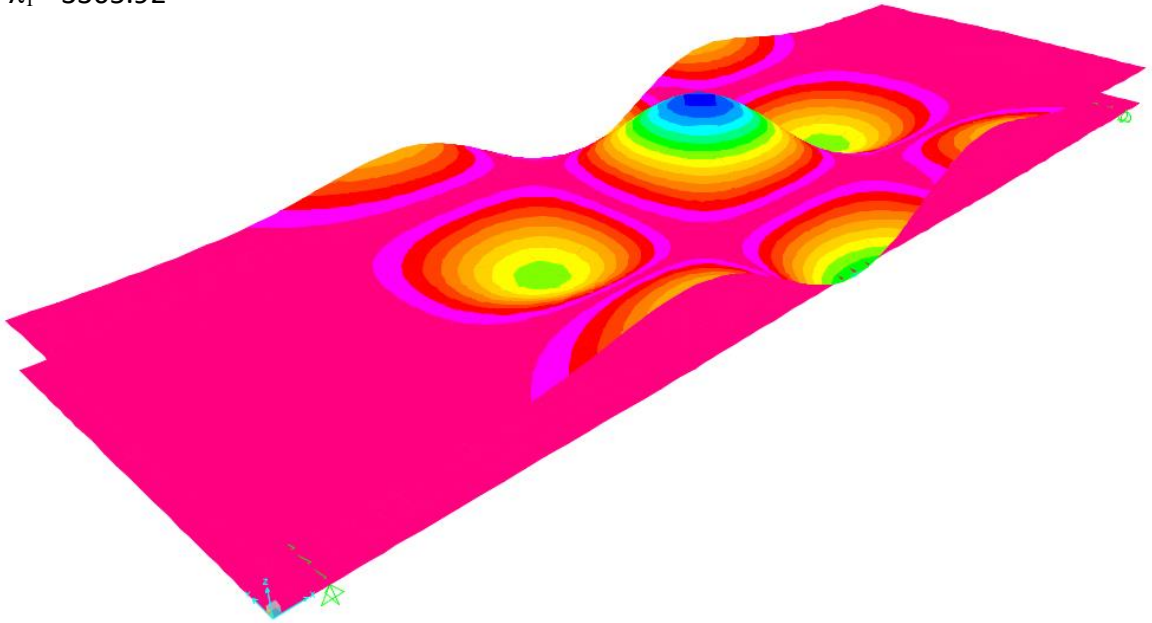
Figura 36. Disposição do painel com conectores longitudinais lisos.



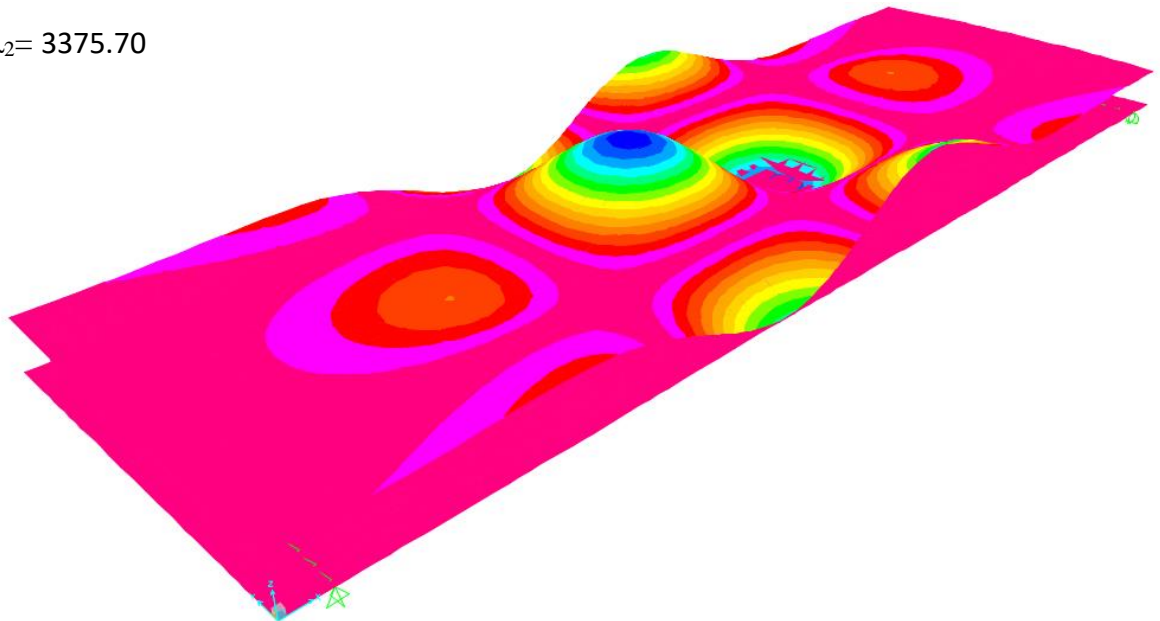
Na Figura 37 ilustram-se os resultados da análise de autovalor e autovetor realizadas para o painel reforçado com conectores longitudinais com dois conectores lisos.

Figura 37. Autovalores e autovetores do modelo I

$$\lambda_1 = 3365.92$$



$$\lambda_2 = 3375.70$$

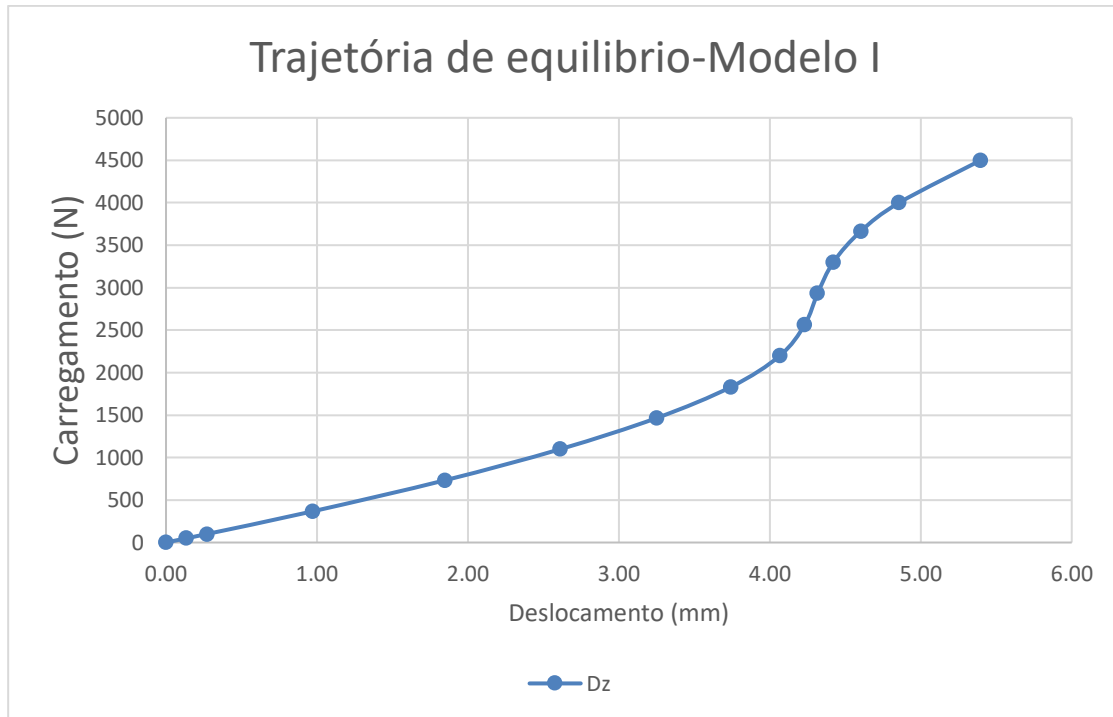


Na Figura 37 se mostra só os dois primeiros modos de instabilidade, já que são de maior interesse no caso da análise de estabilidade.

A trajetória de equilíbrio longitudinal do painel do modelo computacional I é criada a partir da medição do deslocamento na aplicação de carga gradativa de 0.01 vezes da carga total a ser aplicada no ponto médio da camada de cima do painel, ou

seja, os deslocamentos da camada naquele ponto serão obtidos com o controle de força. Na Figura 38 é mostrada a trajetória de equilíbrio do modelo I.

Figura 38. Trajetória de equilíbrio para o modelo I.

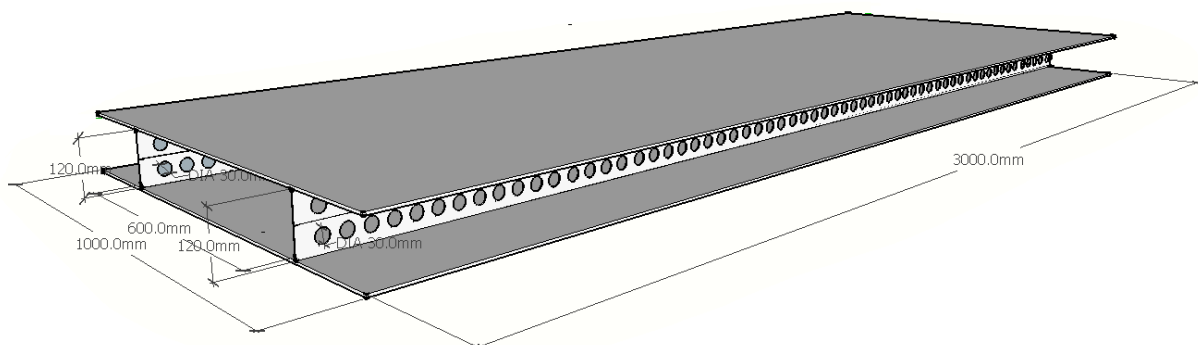


Na análise do tipo P-Delta do SAP 2000 e medindo o deslocamento no ponto médio da camada de cima do painel, o parâmetro de carga limite cuja trajetória de equilíbrio e o ponto limite estão ilustrados no gráfico da Figura 38 que mostra o valor carga crítica sendo de 3365.92 para um deslocamento de 4.60mm.

4.4.2. Modelo II: Painel reforçado com conectores longitudinais furados.

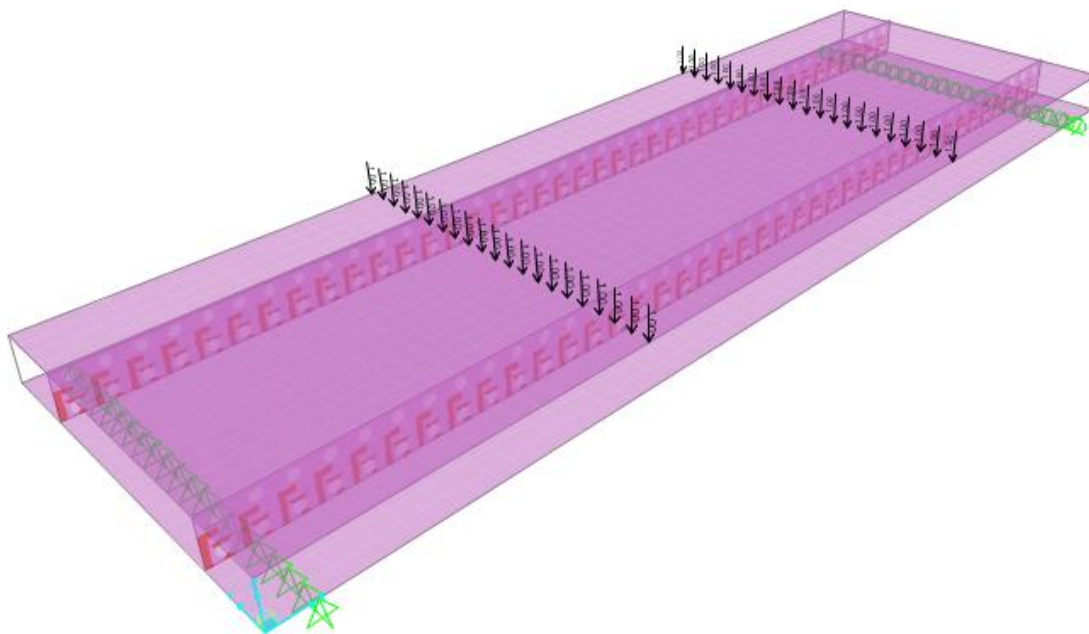
Trata-se de um painel submetido a flexão pura, simplesmente apoiado. Na Figura 39 se pode mostrar as características do modelo.

Figura 39. Disposição do painel com conectores longitudinais furados.



Pode-se observar na Figura 39 que o painel do modelo II consta principalmente de dois painéis e dois conectores furados localizados a uma distância constante sendo esta de 600mm. Na Figura 40 mostra-se a configuração do modelo com o tipo de carga e as condições de apoio. As cargas são perpendiculares à placa.

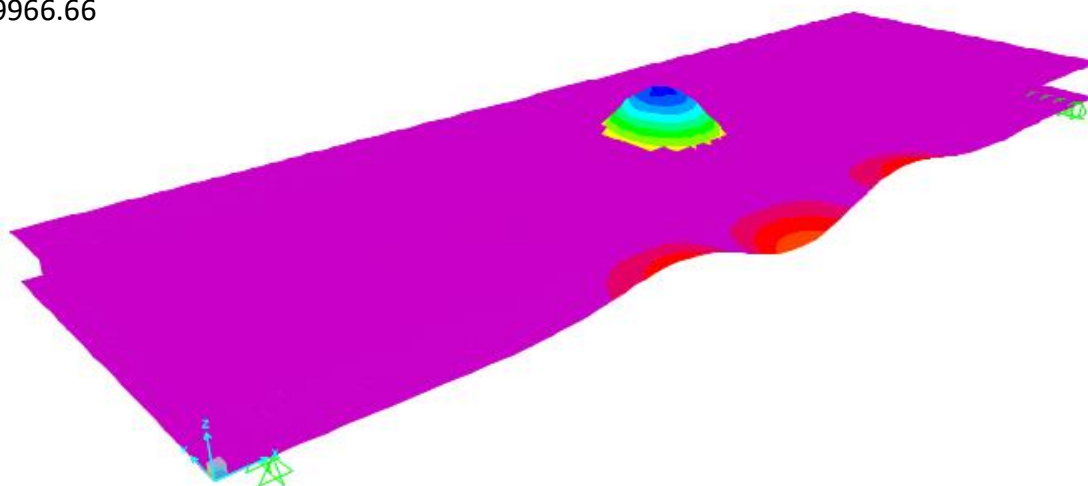
Figura 40. Disposição do painel com conectores longitudinais lisos.



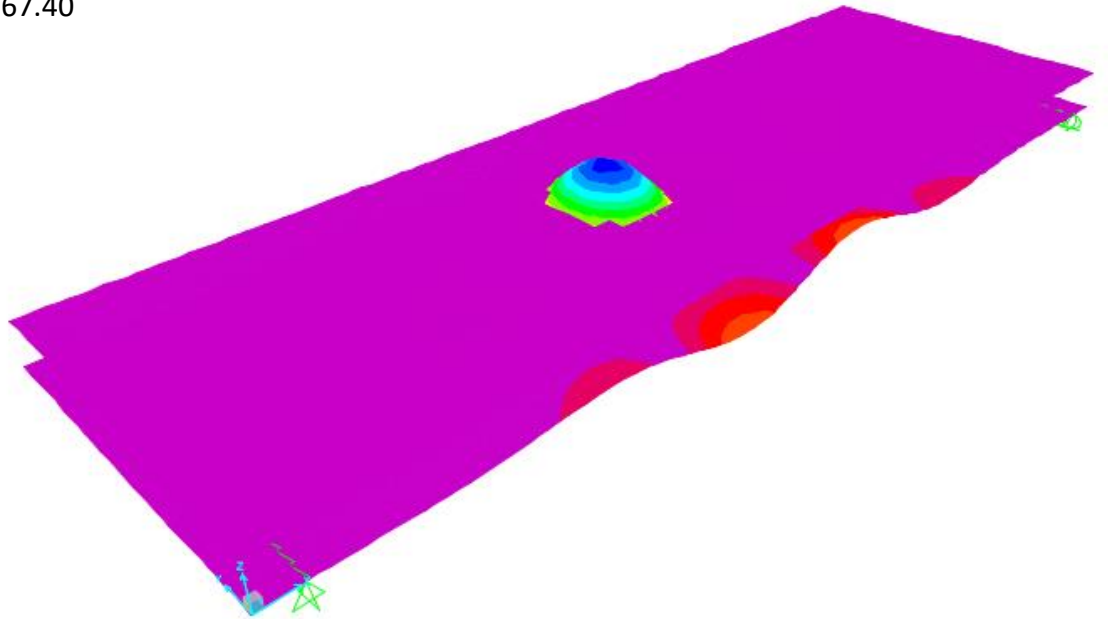
Na Figura 41 ilustram-se os resultados da análise de autovalor e autovetor realizadas para o painel reforçado com conectores longitudinais com dois conectores furados.

Figura 41. Autovalores e autovetores do modelo II

$$\lambda_1 = 9966.66$$

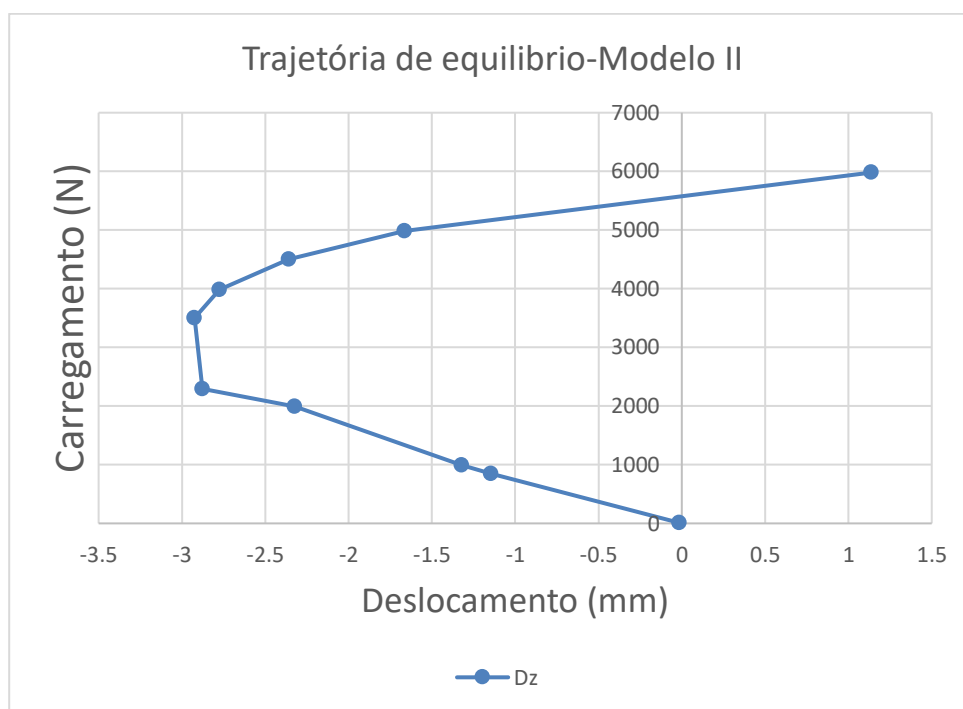


$$\lambda_2 = 9967.40$$



Na Figura 41 se mostra só os dois primeiros modos de instabilidade, já que são de maior interesse no caso da análise de estabilidade.

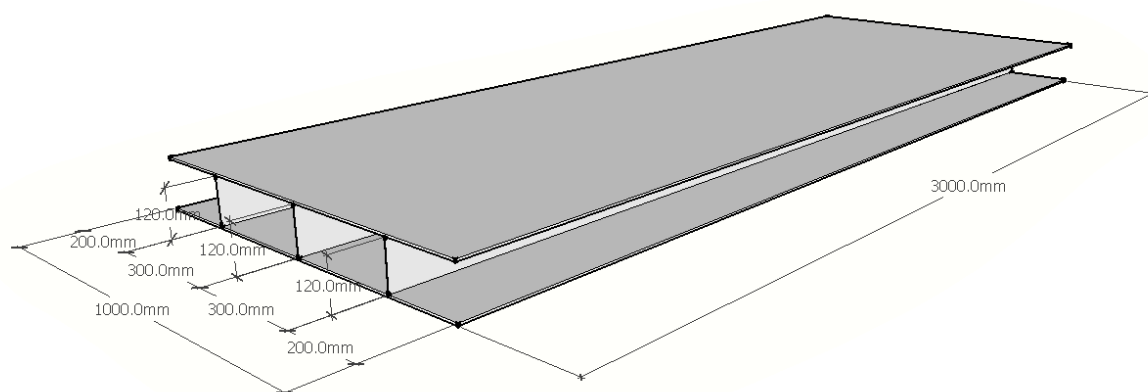
A trajetória de equilíbrio longitudinal do painel do modelo computacional II é criada a partir da medição do deslocamento na aplicação de carga gradativa de 0.01 vezes da carga total a ser aplicada no ponto médio da camada de cima do painel. Na Figura 42 é mostrada a trajetória de equilíbrio do modelo II.

Figura 42. Trajetória de equilíbrio para o modelo II.

A figura mostra um comportamento do primeiro modo de flambagem do painel. Medindo o deslocamento no ponto médio da camada de cima do painel o parâmetro de carga limite cuja trajetória de equilíbrio e o ponto limite estão ilustrados no gráfico da Figura 42.

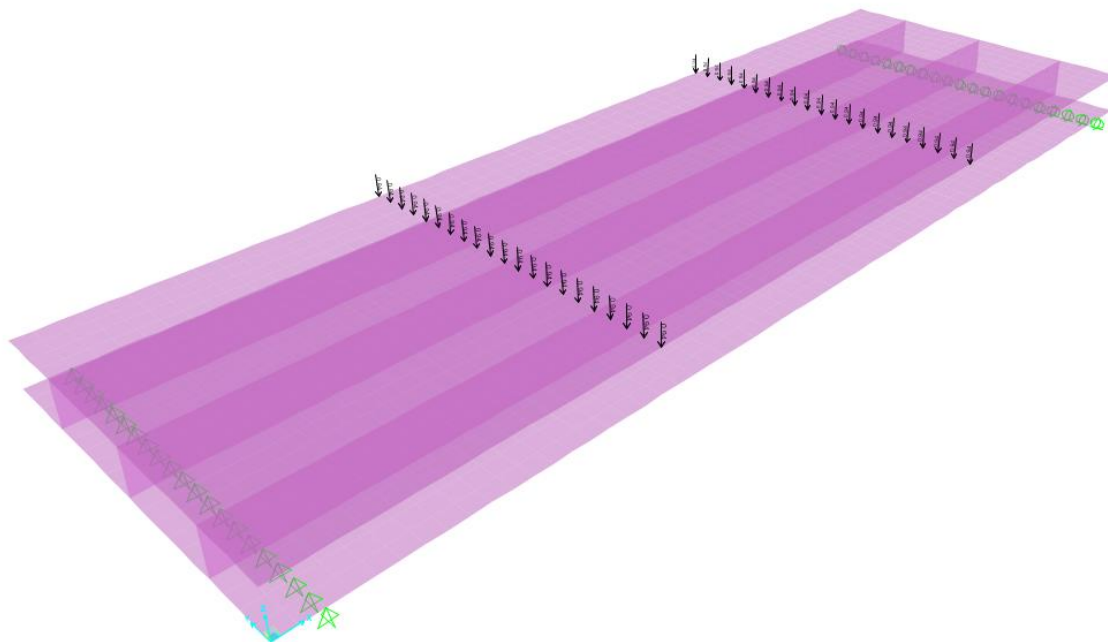
4.4.3. Modelo III: Painel reforçado com conectores longitudinais lisos triples.

Trata-se de um painel da mesma configuração dos outros modelos, ou seja, simplesmente apoiado e com a mesma configuração de carga. Na Figura 43 se pode mostrar as características do modelo.

Figura 43. Disposição do painel com conectores longitudinais lisos triples.

Pode-se observar na Figura 43 que o painel do modelo III consta principalmente de dois painéis e três conectores lisos localizados a uma distância constante sendo esta de 300mm. Na Figura 44 mostra-se a configuração do modelo com o tipo de carga e as condições de apoio.

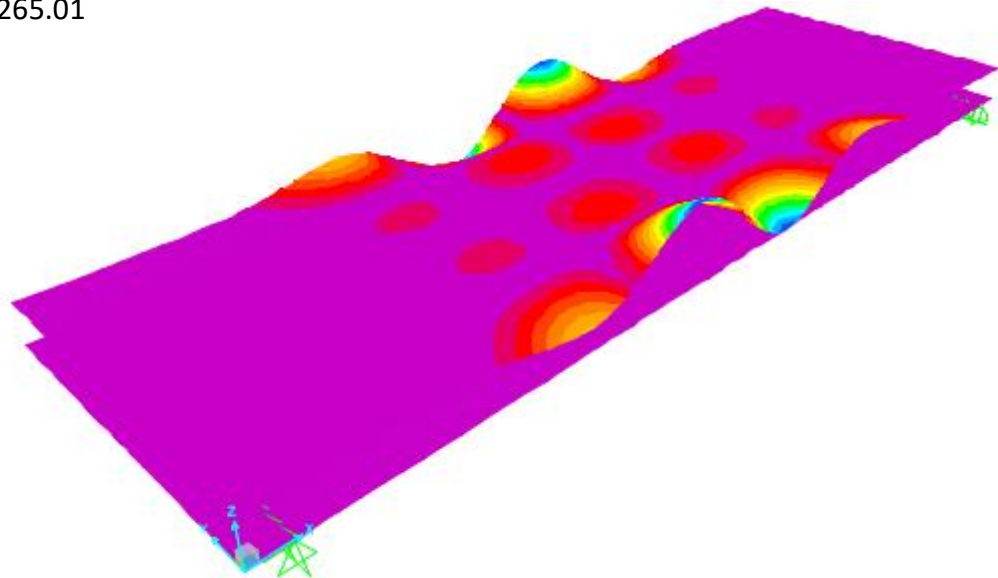
Figura 44. Disposição do painel com três conectores longitudinais lisos.



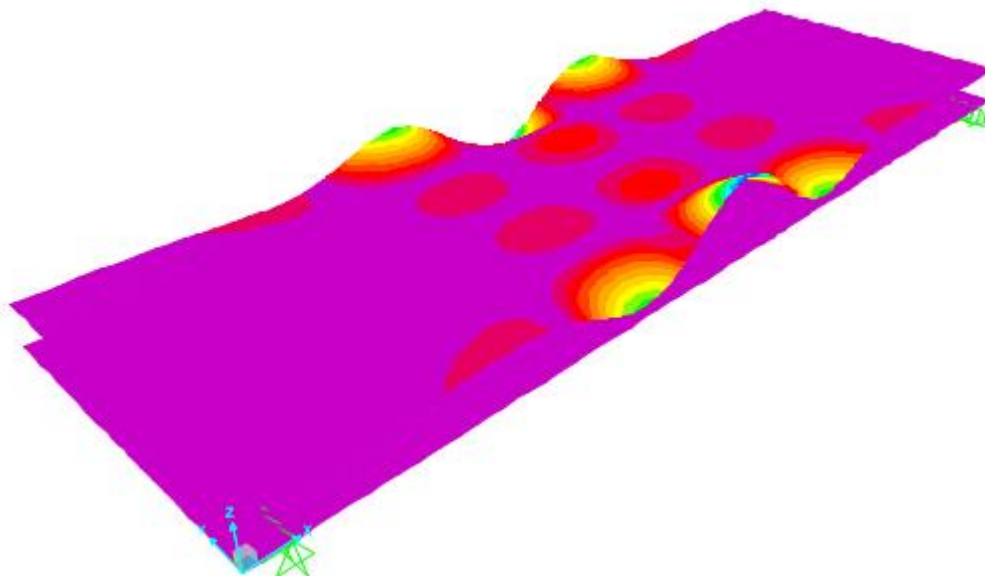
Na Figura 45 ilustram-se os resultados da análise de autovalor e autovetor realizadas para o painel reforçado com conectores longitudinais com três conectores lisos.

Figura 45. Autovalores e autovetores do modelo III

$$\lambda_1 = 7265.01$$

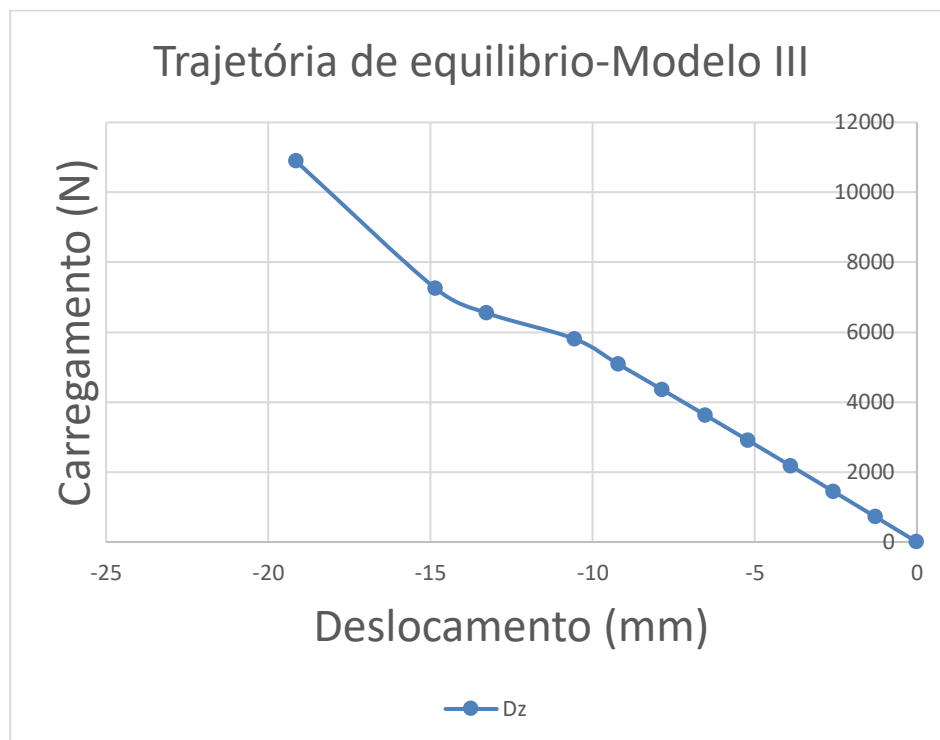


$$\lambda_2 = 7276.14$$



A trajetória de equilíbrio longitudinal do painel do modelo computacional III é criada a partir da medição do deslocamento na aplicação de carga gradativa de 0.01 vezes da carga total a ser aplicada no ponto médio da camada de cima do painel. Na Figura 46 é mostrada a trajetória de equilíbrio do modelo III.

Figura 46. Trajetória de equilíbrio para o modelo III.

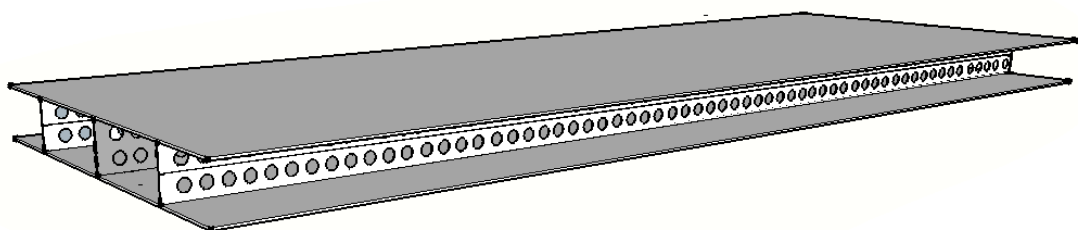


A figura mostra um comportamento do primeiro modo de flambagem do painel medindo o deslocamento no ponto médio da camada de cima do painel o parâmetro de carga limite cuja trajetória de equilíbrio e o ponto limite estão ilustrados no gráfico da Figura 46 que mostra o valor carga crítica sendo de 7265 para um deslocamento de 14.86mm.

4.4.4. Modelo IV: Painel reforçado com conectores longitudinais furados triples.

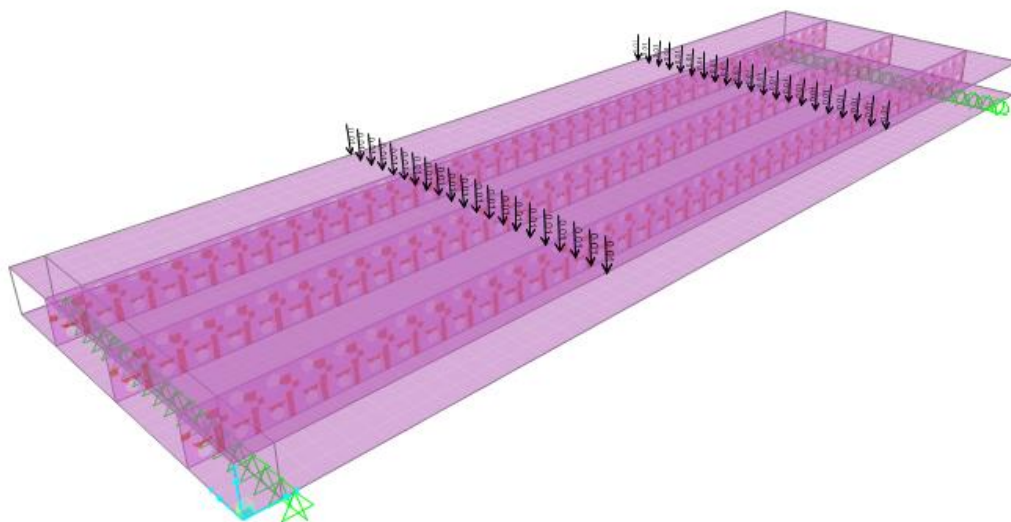
Na Figura 47 se pode mostrar as características do modelo.

Figura 47. Disposição do painel com conectores longitudinais furados triples.



Na Figura 48 mostra-se a configuração do modelo com o tipo de carga e as condições de apoio do modelo IV.

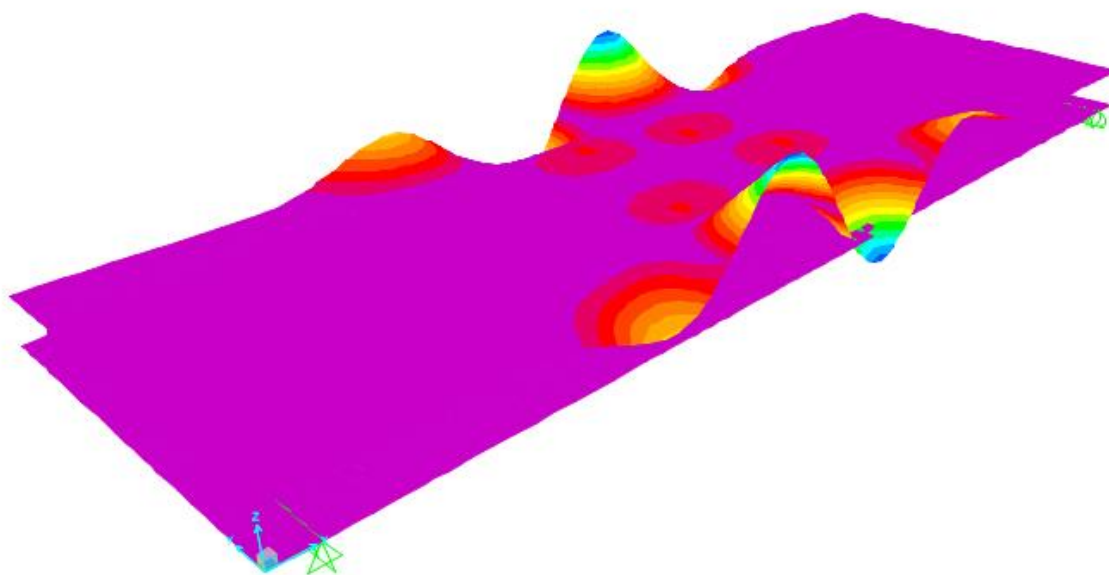
Figura 48. Disposição do painel com três conectores longitudinais furados.



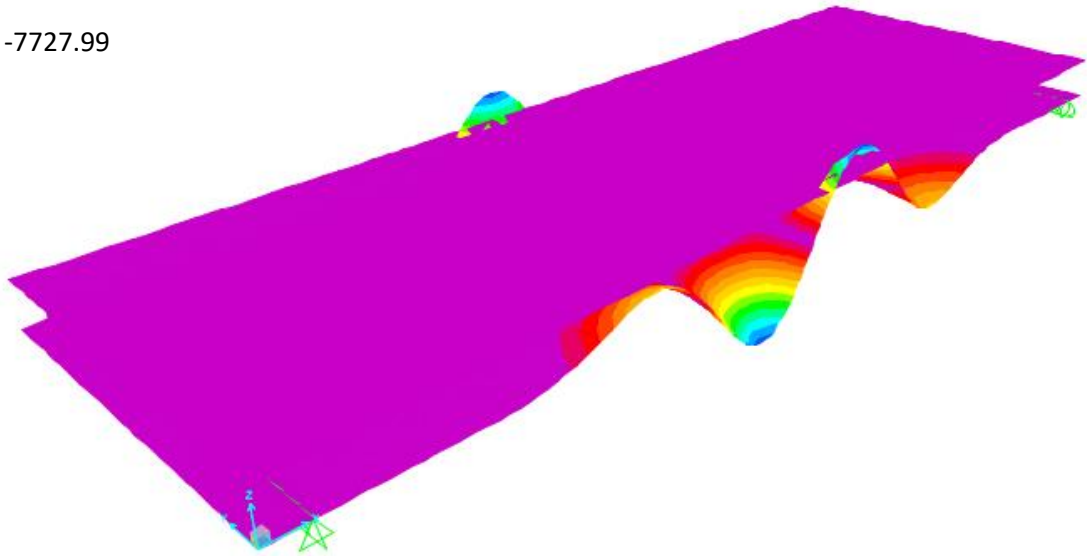
Na Figura 49 ilustram-se os resultados da análise de autovalor e autovetor realizadas para o painel reforçado com conectores longitudinais com três conectores furados.

Figura 49. Autovalores e autovetores do modelo IV

$$\lambda_1 = 7725.32$$

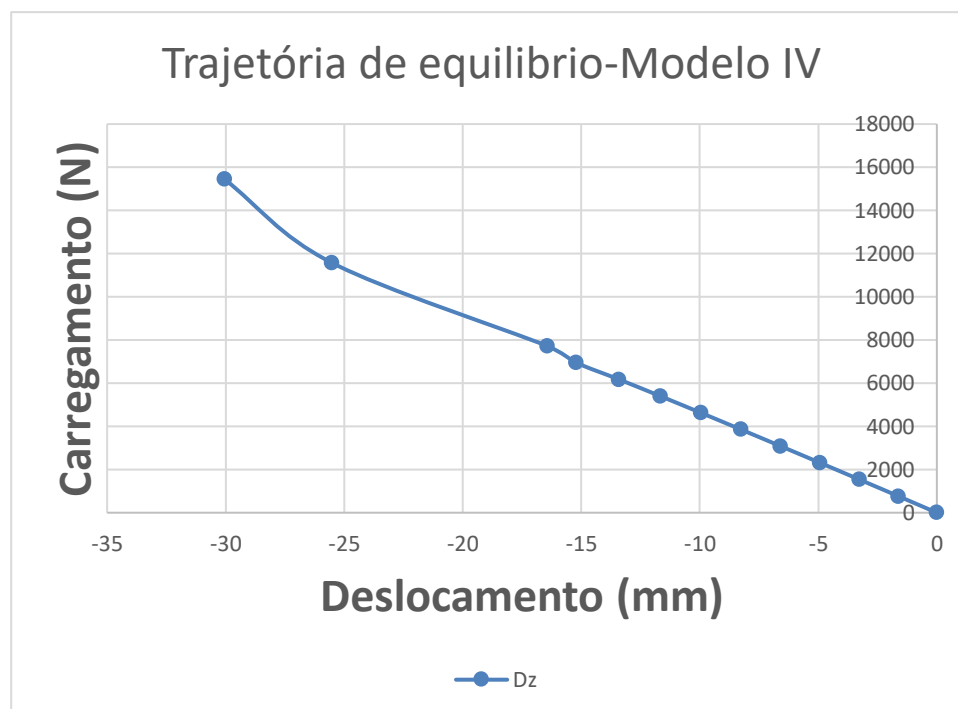


$$\lambda_2 = -7727.99$$



A seguir é mostrada a trajetória de equilíbrio na Figura 50 do modelo IV.

Figura 50. Trajetória de equilíbrio para o modelo IV.



A figura mostra a medição dos deslocamentos no ponto médio da camada de cima do painel o parâmetro de carga limite cuja trajetória de equilíbrio e o ponto limite estão ilustrados no gráfico da Figura 50 que mostra o valor carga crítica sendo de 7725,32 para um deslocamento de 16.45mm.

Pode-se observar a ocorrência de autovalores negativos em alguns dos painéis reforçados, isto é, devido a que a estrutura não está sob a condição de equilíbrio crítico, por isto surge a necessidade de se acrescentar molas desacopladas segundo

os graus de liberdade, para que a estrutura retorne à condição de equilíbrio crítico. Cabe salientar que também que nos resultados dos modos de instabilidade de alguns painéis reforçados o número de autovalores negativos é grande, isto indica a quantidade de pontos críticos ultrapassados na trajetória de equilíbrio e que o número de autovalores é igual a ordem do sistema, a menos da multiplicidade desses valores (KZAM,2016).

4.3. Estudo paramétrico fazendo uso dos modelos construídos

Foi feita a variação dos parâmetros geométricos desses painéis, sendo possível avaliar a influência do aumento da espessura da placa, espessura do conector no valor da carga crítica de flambagem do painel.

A variação paramétrica envolve a geometria do painel e do reforço, que são: espessura da placa, espessura do conector. Esta modelagem foi feita no software SAP 2000 o qual permite a análise de painéis pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

O estudo paramétrico ajudará a compreender o efeito do uso de diferentes configurações do painel, no seu comportamento à flexão. Serão considerados alguns parâmetros que desempenham um papel importante no comportamento estrutural dos painéis como: dimensão do painel (comprimento e largura), espessura das chapas.

Como a primeira variação foi considerada sendo uma placa de comprimento de 3000 mm, largura de 1000 mm, espessura de 6mm com um conector de altura de 120 mm e espessura de 6 mm. O módulo de elasticidade (módulo de Young) e o coeficiente de Poisson do material são, respectivamente, $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$ e $\nu = 0$.

Variando a espessura da placa e dos conectores longitudinais para o modelo I, foram encontrados os resultados expostos na Tabela4.

Tabela 4. Variação da espessura dos painéis e dos conectores modelo I.

t_p (mm)	t_w (mm)	P_{cr} (N)
2	2	178.87
4	6	1580.14
6	8	5201.54
8	10	12141.74

Observa-se um significativo aumento no valor da carga crítica com pequenos incrementos na espessura da placa junto com a espessura do conector. Para todas as espessuras de placa o modo de falha ocorrido foi flambagem global induzida pela placa.

Variando a espessura da placa e dos conectores longitudinais para o modelo II, foram encontrados os resultados expostos na Tabela 5.

Tabela 5. Variação da espessura dos painéis e dos conectores modelo II.

t_p (mm)	t_w (mm)	P_{cr} (N)
2	2	759.38
4	6	3735.85
6	8	9966.66
8	10	20490.1

Nota-se que a tensão crítica sofre elevação com o aumento da espessura do conector. Para as espessuras mostradas na tabela 5 o modo de falha segue do tipo flambagem global induzida pela placa.

No modelo III, pode-se observar que o aumento da espessura do reforço leva a um aumento da carga crítica como mostrado na tabela 6.

Tabela 6. Variação da espessura dos painéis e dos conectores modelo III.

t_p (mm)	t_w (mm)	P_{cr} (N)
2	2	338.4
4	6	3024.05
6	8	9906.72
8	10	23070.65

No modelo IV, pode-se também ocasiona um aumento da carga crítica como mostrado na tabela 7.

Tabela 7. Variação da espessura dos painéis e dos conectores modelo IV.

t_p (mm)	t_w (mm)	P_{cr} (N)
2	2	286.85
4	6	2292.62
6	8	7725.32
8	10	18267.97

A presença dos conectores aumentou com uma dada espessura enquanto mais espessura os conectores tenham maior será a carga crítica de flambagem da placa, confirmando a importância do uso de reforços em placas planas e sua eficiência para aumentar a resistência dos painéis. Se fez uma variação somente da espessura dos conectores mais a elevação da espessura do enrijecedor levou a um aumento menos significativo na carga crítica.

4.3.1. Relação peso/resistência dos painéis

Os painéis estruturais com conectores longitudinais são componentes estruturais constituídos por duas chapas e conectores que atuam como reforços o que aumenta a capacidade de carga do conjunto, com uma elevada relação entre resistência e peso, sendo capazes de resistir a grandes solicitações de carga. Sendo assim, se faz necessário o estudo da relação do peso/resistência desta maneira se pode concluir qual painel modelado será o mais resistente e mais esbelto, assim as peças do conjunto poderão ocupar menos espaço na utilização das mesmas como estruturas com qualquer tipo de utilização.

Tabela 8. Relação peso/resistência dos modelos desenvolvidos.

Modelo	Peso	Pcr	Peso/Pcr
I	2880.26	3365.92	0.855713
II	2863.3	9966.66	0.28729
III	2935.65	7265.01	0.404081
IV	2910.21	7725.32	0.376711

Segundo a tabela 8, pode-se observar que o modelo um apresenta a menor relação de peso/resistência, o modelo um é o modelo de painéis estruturais reforçados com dois conectores lisos, a utilização de reforços, aumenta a sua capacidade de carga. É possível notar que os modelos desenvolvidos com conectores com furos que são os modelos III e IV também apresentam uma boa capacidade de carga e a peso dos painéis não é tão grande, porem são também considerados como eficientes.

CAPITULO 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se o fenômeno de instabilidade estrutural em painéis estruturais com conectores longitudinais. Para entender melhor o estudo de caso proposto neste trabalho, foram desenvolvidos elementos estruturais já modelados previamente com o intuito de se estudar melhor o comportamento, principalmente das chapas e dos elementos estruturais chamados de colunas largas. Finalmente conclui-se do seguinte trabalho o seguinte:

- Os modos de instabilidade das chapas e das colunas largas que foram os modelos para validação da proposta possuem um erro relativo muito pequeno com o modelado no programa SAP2000. Esses modelos foram selecionados com o propósito de estudar o comportamento de uma chapa perante a solicitação de carga que provocariam flexão, ou seja, estudar o fenômeno de instabilidade na flexão.
- O cálculo dos autovalores e autovetores a partir do programa SAP 2000 dos modelos propostos desenvolvidos mostra que o SAP200 é uma ferramenta alternativa eficiente para se modelar estruturas constituídas de chapas finas com conectores ou reforços longitudinais.
- Este trabalho mostra que se pode traçar a trajetória de equilíbrio do primeiro modo de instabilidade dos modelos com a ajuda do software SAP2000.
- Pode-se chegar na conclusão de que com os resultados gerados que o modelo I e o modelo III apresentam maior rigidez para a estrutura, ou seja terão maior capacidade de carga para suportar as cargas aplicadas no elemento estrutural,
- A presença dos conectores ou reforços aumentou o valor da carga crítica dos painéis, confirmando a importância do uso de reforços para aumentar a resistência dos painéis.
- A elevação da espessura do conector levou a um aumento menos significativo da carga crítica. Então, pode-se concluir que a carga crítica aumentou quase que proporcionalmente com o aumento da espessura das chapas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

AZEVEDO, P. M. **Estudo do comportamento de painéis sandwich com conectores em GFRP. Ensaios à escala real**. 2013. p. 1-191. Tese de Mestrado-Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

AMANTE, D. A M. **Imperfeições de fabricação na construção naval e offshore**. 2006. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidad Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BENAYOUNE, A.; SAMAD, A. A.; TRINKHA, D. N.; ALI, A. A.; ELLINNA, S. H. M. **“Flexural behavior of pre-cast concrete sandwich composite panel - Experimental and theoretical investigations”**, *Construction and Building Materials*, vol. 22(4), pp. 580-592. 2008.

BUNN, W. G. **“CFRP Grid/Rigid Foam Shear Transfer Mechanism for Precast, Prestressed Concrete Sandwich Wall Panels”**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual da Carolina do Norte. 2011.

COLLINS, F. T. **Precast concrete sandwich panels for tilt-up construction**. American Concrete Institute -- Journal, 26(2), 149-164. 1954.

CORREIA, J.R.; GARRIDO, M.; GONILHA, J.A.; BRANCO, F.A.; REIS, L.G. **"GFRP sandwich panels with PU foam and PP honeycomb cores for civil engineering structural applications: Effects of introducing strengthening ribs"**. *International Journal of Structural Integrity*, Vol. 3 (2), pp. 127 – 147. 2012.

CUSINATO, R.; GUERRA, R. Pré-moldados e pré-fabricados são opções rápidas para construir. **Jornal o Globo**, São Paulo, fev. 2016. Disponível em: <http://glo.bo/23DAcdX>. Acesso em: 07 set. 2016.

DANIELSON, D.A., KIHLE, D.P., and HODGES, D.H., **Tripping of Thin-Walled Plating Stiffeners in Axial Compression**, *Thin-Walled Structures*, Vol. 10, pp. 121 – 142, 1990

DE FARIA, R. P. H. **Estudo da simplificação na modelação de painéis reforçados**. 2014. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

- DE SOUZA, C. M. R. **Análise e dimensionamento de painéis enrijecidos estudo de caso de silo metálico**. 2009. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009
- HUGHES, O.F. and MA, M., **In-Elastic Analysis of Panel Collapse by Stiffeners Buckling, Computers and Structures**, Vol. 61, No. 1, pp. 107 – 117, 1996.
- LEUNG, A. K. **Structural desing and analysis of concrete sándwich panels and their practical appplications**. 1984. p. 1-115. Dissertação (Mestre em Estruturas)- University of Newfoundland, 1984
- KZAM, L. K. A. **Análise da instabilidade estrutural global e local pelo MEF posicional com determinação de pontos críticos na trajetória de equilíbrio**. 2016. p. 1-236. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de Estruturas de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- MEIRELLES, C. R. M.; PIMENTA, P. M. **Análise Linear da Estabilidade de Trelças Utilizando O Método de Lanczos**. Boletim Técnico da Escola Politécnica, São Paulo, v. 14, p. 1-15, 1995.
- OROZCO, G. J. C. **Contribuição ao estudo de painéis reforçados: comparação entre o método da chapa ortotrópica e o método de elementos finitos**. 2009. 195 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- PAIK J.K. and THAYAMBALLI A.K., **Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures**, John Wiley & Sons, Limited, 2003.
- PCI INDUSTRY HANDBOOK COMMITTEE. **PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete**, 6th ed. Chicago, IL: PCI. 2004.
- RACKOW, B. P; REAL, M. de V; ISOLDI, L. A; COLARES, R; THORMANN, D. **Análise paramétrica de um painel com enrijecedor sob flambagem elástica**. **Scientia Plena**. Universidade Federal do Rio Grande, p. 317-326.out. 2015.
- REIS, A.; CAMOTIM, D. **Estabilidade estrutural**. Lisboa: Portugal: McGRAW-HILL, 2001.
- RIVERA, R. M. R. **Flambagem de painéis de aço enrijecidos em diferentes temperaturas**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- RIZKALLA, S. H.; M. DAWOOD. **Advances on the Use of FRP for the Precast Concrete Industry**. FRPRCS-9. Sydney, Australia, 2009.

SALMON, D. C.; EINEA, A.; TADROS, M. K., CULP, T. D. **“Full Scale Testing of Precast Concrete Sandwich Panels”**, ACI Structural Journal, vol. 94 (July- August), pp. 354-362. 1997.

SIMITSES, G. J.; HODGES, D. H. **Fundamentals of Structural Stability**. Oxford: Elsevier, 2006.

TELES, O. B.; DIAS, J. H. P.; BRITO, Q. T. **Avaliação da estabilidade global em estruturas em aço**. 2016, 143f, TCC (Graduação)- Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. **Theory of elastic stability**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 1961.

TOMLINSON, D. G. **Behavior of partially composite precast concrete sandwich panels under flexural and axial loads**. 2015. p. 70. Dissertação (Doutoramento em Engenharia Civil) – Queen’s University, Kingston, 2015.

VASCONCELLOS, C. M. R. **Ligações especiais para painéis reforçados**. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2011.